

Eduardo Henrique Zanella de Arruda

**ANÁLISE DE EVENTOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE
POTÊNCIA EM TEMPO REAL UTILIZANDO SINCROFASORES
E A TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Dr. Ildemar Cassana
Decker.

Florianópolis
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Arruda, Eduardo

ANÁLISE DE EVENTOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE
POTÊNCIA EM TEMPO REAL UTILIZANDO SINCROFASORES E A
TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA / Eduardo Arruda ;
orientador, Ildemar Decker, 2017.

188 p.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina,
Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica,
Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Análise de Eventos. 3. Wide Area
Measurement System. 4. Transformada Wavelet Discreta. 5. Tempo Real.
I. Decker, Ildemar. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

Eduardo Henrique Zanella de Arruda

**ANÁLISE DE EVENTOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE
POTÊNCIA EM TEMPO REAL UTILIZANDO SINCROFASORES
E A TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas de Energia Elétrica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 09 de junho de 2017.



Prof. Marcelo Lobo Heldwein, D.Sc.
Coordenador do Curso

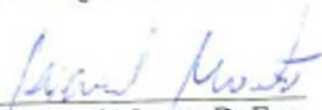
Banca Examinadora:



Prof. Idemar Cassana Decker, D.Sc.
Orientador e Presidente



Prof. Diogo Issicaba, Ph.D.



Prof. Miguel Moreto, Dr.Eng.



Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D.

Aos meus pais Alberto Sebastião de Arruda e Virte Zanella de Arruda por terem me educado e me guiado ao caminho do conhecimento. Aos meus irmãos Paulo, André e Marcelo por todo o apoio ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à toda a minha família pelo enorme incentivo dado para a realização deste curso de Pós-Graduação. Aos meus pais pelo apoio psicológico e financeiro ao longo dos estudos e a família Hess pelo acolhimento e amizade.

Agradeço ao meu orientador Ildemar C. Decker pela orientação e paciência ao longo dos desenvolvimentos deste trabalho. Aos professores do LabPlan/UFSC e a Luciana Cabral.

A toda equipe do Projeto MedFasee/UFSF pela amizade e colaborações, em especial ao Rodrigo Vaz pela imensa contribuição com a programação em linguagem C#.

A todos os meus amigos que me acompanharam ao longo desta jornada e que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, em especial: Débora Duarte, Vanessa P. Guarienti, Nívea Morena, Mariana Nau, Vanessa M. Ramos e Alexandre Caldas.

“From a certain point onward there is no longer any turning back. That is the point that must be reached.”

Franz Kafka (The Trial), 1914.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo o estudo e o desenvolvimento de metodologias para a análise automática de eventos, em tempo real, em Sistemas de Energia Elétrica (SEE), com a utilização de dados de medição sincronizada de fasores (SMSF) e da Transformada Wavelet Discreta (TWD). As metodologias aplicadas empregam conceitos dos sistemas de monitoramento de grandes áreas (WAMS). Tais sistemas visam melhorar e facilitar a operação em tempo real de grandes SEEs, os quais reduzem o tempo para a tomada de decisões a fim de evitar a propagação de eventos por meio do efeito cascata, diminuindo, assim, a ocorrência de blecautes. A análise automática de eventos engloba a detecção em tempo real, a classificação quanto ao tipo de evento, sua localização e a magnitude em MW, quando há cortes de carga ou geração. Todas as etapas do processo de análise de eventos fazem o uso da TWD, por meio de uma análise multiresolução (AMR). Essa técnica de análise de sinais se destaca pela capacidade de decompor o sinal em funções no domínio do tempo e da frequência, simultaneamente, os quais permitem identificar as frequências existentes no sinal em seu respectivo instante temporal. As características dos sinais são observadas em tempo real e, na ocorrência de um evento, as características do evento, por sua vez, são extraídas em diferentes resoluções e interpretadas pelo algoritmo desenvolvido. O algoritmo foi implementado em linguagem C# e validado com dados do Sistema Nacional de Medição Sincronizada de Fasores em Baixa Tensão (110 ou 220 V) - SMSF MedFasee BT/UFSC. Este sistema dispõe de 25 pontos de medição instalados em universidades, abrangendo 20 estados das cinco regiões geográficas do país. Os resultados obtidos demonstram que a TWD apresenta resultados efetivos em todas as etapas do processo de análise automática de eventos em SEE em tempo real.

Palavras-Chave: Análise de Eventos, Transformada Wavelet Discreta, Tempo Real, WAMS.

ABSTRACT

This work has as objective the study and the development of methodologies for the automatic analysis of events in real-time, in Electric Power Systems (EPS), with the use of synchronized phasor measurement data and the Discrete Wavelet Transform (DWT). The methodologies use the concept of wide area measurement systems (WAMS). Such systems aim to improve and facilitate the real-time operation of large EPS, reducing the time for actions to be taken, in order to prevent the propagation of an event through the cascading effect, thereby decreasing blackout occurrences. Automatic event analysis encompasses real-time detection, classification of type of event, its location and its magnitude, in MW, when there are load or generation shedding. All stages of the process of event analysis make use of TWD through a Multiresolution Analysis (AMR). This signal analysis technique is highlighted by the capacity to decompose the signal into functions in time and frequency domains simultaneously, which allows identifying the existing frequencies of the signal at their respective time instant. The signal characteristics are observed in real-time and, with the occurrence of an event, the event characteristics are extracted at different resolutions and interpreted by the developed algorithm. The algorithm was developed in C# language and validated with data from the National Synchronized Measurement System at Low Voltage (110 or 220 V) - SMSF MedFasee BT. This system has 25 measuring points installed at universities, covering 20 states of the five geographic regions of Brazil. The acquired results show that DWT presents effective results in all stages of the processes of automatic event analysis in real-time, in EPS.

Keywords: Event analysis, Discrete Wavelet Transform, Real Time, WAMS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Métodos existentes na localização de eventos.....	28
Figura 1.2 – Problema de triangulação.....	30
Figura 2.1 – Instituições que dão corpo ao setor elétrico nacional.....	39
Figura 2.2 – Interligação Eletroenergética do Sistema Brasileiro.....	40
Figura 2.3 – Potência Instalada (%) por Tipo de Geração.....	41
Figura 2.4 – Evolução Mensal da Carga em MWmed*.....	42
Figura 2.5 – Mapa de Transmissão SIN, horizonte 2015.....	43
Figura 2.6 – Evolução do número de perturbações e seu impacto sobre o SIN.....	44
Figura 2.7 – Classificação das aplicações de SMSF.....	48
Figura 2.8 – Plataforma online de monitoramento do Projeto MedFasee BT.....	50
Figura 2.9 – Configuração inicial da implantação do SMSF-SIN.....	54
Figura 3.1 – Fenômenos transitórios em Sistemas de Energia Elétrica.....	58
Figura 3.2 – Oscilação natural da frequência em uma janela de 8 minutos com uma perda de carga às 15h14min53seg.....	61
Figura 3.3 – Frequência ao longo do Evento 1.....	64
Figura 3.4 – (a) Módulo e (b) fase da tensão de sequência positiva do Evento 1..	64
Figura 3.5 – Oscilação da frequência do Evento 2.....	65
Figura 3.6 – Frequência na abertura do Evento 3.....	66
Figura 3.7 – (a) Frequência e (b) detalhe do instante inicial do Evento 4.....	66
Figura 3.8 – (a) Frequência e (b) detalhe do instante inicial do Evento 5.....	67
Figura 3.9 – (a) Frequência e (b) detalhe do instante inicial do Evento 6.....	68
Figura 3.10 – (a) Módulo e (b) diferença angular da tensão do Evento 6.....	68
Figura 3.11 – (a) Frequência e seu (b) detalhe no Evento 7.....	70
Figura 3.12 – (a) Módulo da tensão e (b) diferença angular do Evento 7.....	70
Figura 3.13 – Ilhamento da região AC/RO (Evento 8).....	72
Figura 3.14 – Frequência ao longo do Evento 9.....	73
Figura 3.15 – Módulo e diferença angular da tensão no instante inicial do Evento 9.....	74
Figura 3.16 – Módulo e diferença angular da tensão no instante de reconexão do Evento 9.....	75
Figura 3.17 – Frequência durante o Evento 10.....	77
Figura 3.18 – Espectro de frequência durante o Evento 10.....	77
Figura 3.19 – (a) Frequência, (b) módulo da tensão e (c) diferença angular no início do Evento 10.....	78
Figura 3.20 – (a) Frequência e (b) módulo da tensão em operação normal.....	80
Figura 4.1 – Comparação entre o tamanho das janelas da TF e da TW.....	84
Figura 4.2 – Wavelet Haar (esquerda) e Daubechies (direita).....	86
Figura 4.3 – Exemplo da TWD utilizando a wavelet Haar.....	87
Figura 4.4 – Exemplo da TWD utilizando a wavelet Haar na versão espelhada do sinal.....	88
Figura 4.5 – TWD em 8 níveis para uma Perda de Geração.....	90
Figura 4.6 – TWD em 8 níveis para uma Perda de Carga.....	91
Figura 4.7 – TWD em 8 níveis para um Salto (abertura de linha).....	92

Figura 4.8 – Representação de uma janela deslizante.....	94
Figura 4.9 – Fluxograma do Detector de Eventos.....	97
Figura 4.10 – Espectro wavelet para eventos do tipo (a) perda de geração, (b) perda de carga e (c) salto. O eixo horizontal corresponde ao nível da decomposição.....	100
Figura 4.11 – Espectro wavelet dos níveis 5 ao 7 para o evento da Figura 3.5. O eixo horizontal corresponde ao nível da decomposição.....	101
Figura 4.12 – Espectro wavelet para eventos do tipo ilhamento. O eixo horizontal corresponde ao nível da decomposição.....	101
Figura 4.13 – Dois eventos do tipo Ilhamento em sequência.....	103
Figura 4.14 – Perda de 630 MW de carga em Salvador no dia 17/11/2016.....	103
Figura 4.15 – Fluxograma da Primeira Etapa da Classificação de Eventos.....	105
Figura 4.16 – Fluxograma da Segunda Etapa da Classificação de Eventos.....	107
Figura 4.17 – Pontos de interesse para a estimação da magnitude do evento.....	109
Figura 4.18 – Representação de um sistema multimáquinas.....	112
Figura 4.19 – Representação do modelo multimáquinas equivalente.....	112
Figura 4.20 – Pontos de interesse para o cálculo da taxa de variação.....	114
Figura 4.21 – PMUs consideradas para o cálculo da df/dt	115
Figura 4.22 – Janela utilizada para o cálculo da taxa de variação da frequência.....	115
Figura 4.23 – Relação entre a magnitude de eventos com a df_c/dt	115
Figura 4.24 – Relação entre a magnitude de eventos (a) inferior e (b) superior a 500 MW com a df_c/dt	116
Figura 4.25 – Relação entre a E_H e a df_c/dt	117
Figura 4.26 – Relação entre a magnitude de eventos com a E_H	117
Figura 4.27 – Relação entre a magnitude de eventos (a) inferior e (b) superior a 500 MW com a E_H	118
Figura 5.1 – Ambiente computacional para validação metodológica.....	125
Figura 5.2 – (a) Frequências e (b) detalhes do instante inicial do Evento 01.....	126
Figura 5.3 – (a) EWM e (b) EWN do Evento 01.....	127
Figura 5.4 – Localização do Evento 01.....	128
Figura 5.5 – (a) Frequências e (b) detalhes do instante inicial do Evento 02.....	129
Figura 5.6 – (a) EWM e (b) EWN do Evento 02.....	130
Figura 5.7 – Localização do Evento 02.....	131
Figura 5.8 – Comparação da EWN com (a) 3 e (b) 4 níveis de decomposição....	131
Figura 5.9 – Frequências do Evento 03 na janela do classificador.....	133
Figura 5.10 – (a) E_H e (b) E_L do Evento 03.....	133
Figura 5.11 – Localização do Evento 03.....	134
Figura 5.12 – (a) Frequências e (b) detalhes do instante inicial do Evento 04.....	135
Figura 5.13 – (a) E_H e (b) E_L do Evento 04.....	135
Figura 5.14 – Localização do Evento 04.....	136
Figura 5.15 – (a) Frequências e (b) detalhes do instante inicial do Evento 05.....	137
Figura 5.16 – E_H do Evento 05.....	137
Figura 5.17 – Diferenças angulares do Evento 05.....	138
Figura 5.18 – (a) Frequências e (b) detalhes do instante inicial do Evento 05....	139
Figura 5.19 – Frequências do Evento 06 na janela do classificador.....	140

Figura 5.20 – IHM principal do aplicativo computacional.....	142
Figura 5.21 – Seção <i>Status</i> do aplicativo.....	144
Figura 5.22 – (a) Frequência e (b) detalhe do instante inicial do Evento 01.....	145
Figura 5.23 – (a) Frequência e (b) detalhe do instante inicial do Evento 02.....	146
Figura 5.24 – Frequência ao longo do Evento 03.....	147
Figura 5.25 – Frequência ao longo do Evento 04.....	148
Figura 5.26 – Frequência ao longo do Evento 05.....	148
Figura 5.27 – Detalhe da frequência no instante inicial do Evento 05.....	149
Figura 5.28 – Frequência ao longo do Evento 06.....	150
Figura 5.29 – Detalhes das frequências nos 3 eventos do Evento 06.....	150
Figura 5.30 – Status do aplicativo após 3 dias de operação.....	152
Figura 5.31 – Frequência em um evento com ilhamento no dia 25/02/2017.....	153
Figura A.1 – Comparação entre a TF (a) e a TW (b).....	170
Figura A.2 – Porcentagem de publicações com a TW em sistemas de potência.....	171
Figura A.3 – Sistema de supervisão/proteção de LTs baseado na Análise Multiresolução da TW.....	172
Figura A.4 – Escala e Translação da Wavelet Haar.....	174
Figura A.5 – Esquema da Análise Multiresolução da TWD.....	178
Figura A.6 – Análise Multiresolução da TWD em 6 níveis. Lado esquerdo wavelet “Haar” (db1) e lado direito wavelet “Daubechies 4” (db4).....	179
Figura A.7 – Wavelets (a) Haar e (b) Meyer.....	180
Figura A.8 – Wavelets (a) Daubechies 4 e (b) Daubechies 10.....	181
Figura A.9 – Wavelets (a) Symlets 4 e (b) Symlets 8.....	181
Figura A.10 – Wavelets (a) Mexican Hat e (b) Morlet.....	181
Figura D.1 – Estimação da magnitude para eventos menores do que 500 MW utilizando a Equação 4.23.....	187
Figura D.2 – Estimação da magnitude para eventos maiores do que 500 MW utilizando a Equação 4.24.....	187
Figura D.3 – Estimação da magnitude para eventos menores do que 500 MW utilizando a Equação 4.25.....	188
Figura D.4 – Estimação da magnitude para eventos maiores do que 500 MW utilizando a Equação 4.26.....	188

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil (MW).....	41
Tabela 2.2 – Linhas de Transmissão Instaladas no SIN até janeiro de 2017.....	42
Tabela 3.1 – Ajustes do ERAC para a região Acre-Rondônia.....	72
Tabela 3.2 – Características dos eventos.....	79
Tabela 5.1 – Eventos utilizados no ambiente de experimentação.....	125
Tabela 5.2 – Eventos detectados em tempo real.....	144
Tabela C.1 – Perda de geração.....	185
Tabela C.2 – Perda de carga.....	185
Tabela C.3 – Ilhamento.....	185
Tabela C.4 – Salto.....	186
Tabela C.5 – Salto seguido de oscilação.....	186

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BT – Baixa Tensão
CL – Consumidor Livre
COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
DFT – Transformada Discreta de Fourier
EMS – *Energy Management Systems*
ERAC – Esquema Regional de Alívio de Carga
EPS – *Electrical Power System*
ESP – Estabilizadores de Sistemas de Potência
EWM – Energia Wavelet Modificada
EWN – Energia Wavelet Normalizada
FACTS – *Flexible Alternate Current Transmission System*
FK – Filtro de Kalman
FMM-TV – Filtro Média Móvel utilizando a Taxa de Variação da Frequência
FMM-PF – Filtro Média Móvel Passa Faixa
FNET – *Frequency Monitoring Network*
GPS – *Global Positioning System*
GUI – *Graphical User Interface*
HVDC – *High Voltage Direct Current*
IED – *Intelligent Electronic Device*
IHM – Interface Homem-Máquina
ITAI – Instituto de Tecnologia Aplicada e Inovação
LEO – *Low-Earth Orbiting*
LT – Linha de Transmissão
NERC – *North American Electric Reliability Council*
ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico
PC – Perda de Carga
PCL – *Power Line Communication*
PDC – *Phasor Data Concentrator*
PG – Perda de Geração
PMU – *Phasor Measurement Unit*
PTI – Parque Tecnológico de Itaipu
QMF – *Quadrature Mirror Filter*
RNA – Rede Neural Artificial
ROCOF – *Rate of Change of Frequency*
SCADA – *Supervisory Control and Data Acquisition*
SE – Subestação
SEE – Sistema de Energia Elétrica
SIN – Sistema Interligado Nacional
SMSF – Sistema de Medição Sincronizada de Fasores
SPMS – *Synchronized Phasor Measurement System*
STFT – *Short Time Fourier Transform*
TF – Transformada de *Fourier*

TP – Transformador de Potência
TW – Transformada Wavelet
TWC – Transformada Wavelet Contínua
TWD – Transformada Wavelet Discreta
UDA – *Universidad de Atacama*
UDEC – *Universidad de Concepción*
UFAC – Universidade Federal do Acre
UFAM – Universidade Federal do Amazonas
UFBA – Universidade Federal da Bahia
UFC – Universidade Federal do Ceará
UFES – Universidade Federal do Espírito Santo
UFJF – Universidade Federal de Juiz de Fora
UFMA – Universidade Federal do Maranhão
UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais
UFMS – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
UFMT – Universidade Federal de Mato Grosso
UFPA – Universidade Federal do Pará
UFPE – Universidade Federal de Pernambuco
UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFRR – Universidade Federal de Roraima
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
UFT – Universidade Federal do Tocantins
UHE – Usina Hidrelétrica
UNB – Universidade de Brasília
UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas
UNIFAP – Universidade Federal do Amapá
UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá
UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa
UNIR – Universidade Federal de Rondônia
USACH – *Universidad de Santiago de Chile*
USP_SC – Universidade de São Paulo – São Carlos
UTC – *Universal Time Coordinated*
UTEM – *Universidad Tecnológica Metropolitana*
UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VPN – *Virtual Private Network*
WACS – *Wide Area Control System*
WAMPACS – *Wide Area Monitoring, Protection and Control System*
LabPlan – Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica
WAPS – *Wide Area Protection System*
WAMS – *Wide Area Measurement System*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	25
1.1. ANÁLISE DE EVENTOS.....	26
1.1.1. Detecção de Eventos.....	27
1.1.2. Classificação de Eventos.....	27
1.1.3. Localização de Eventos.....	28
1.1.4. Estimação da Magnitude do Evento.....	30
1.2. TRANSFORMADA WAVELET.....	31
1.3. OBJETIVOS.....	33
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	34
2. SINCROFASORES NO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO.....	35
2.1. A ORGANIZAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO.....	35
2.2. O SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL – SIN.....	39
2.2.1. Aspectos Estruturais.....	39
2.2.2. Aspectos da Operação.....	43
2.3. NOVAS TECNOLOGIAS DE MONITORAMENTO E CONTROLE PARA O SIN.....	45
2.3.1. Sistemas de Medição Sincronizada de Fasores.....	45
2.3.2. O Projeto MedFasee/UFSC.....	49
2.3.3. O Projeto de SMSF para o SIN (SMSF-SIN).....	51
2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	55
3. EVENTOS EM SEE.....	57
3.1. DEFINIÇÕES.....	57
3.2. TIPOS DE EVENTOS.....	61
3.2.1. Eventos do Tipo Salto.....	62
3.2.2. Eventos do Tipo Perda de Carga.....	67
3.2.3. Eventos do Tipo Perda de Geração.....	69
3.2.4. Eventos do Tipo Ilhamento.....	71
3.2.5. Eventos do Tipo Oscilações Sustentadas.....	76
3.2.6. Síntese dos Tipos de Eventos.....	79
3.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	81
4. DESENVOLVIMENTOS.....	83
4.1. TRANSFORMADA WAVELET.....	83
4.1.1. Wavelet Haar.....	86
4.1.2. Transformada Wavelet Discreta em Eventos de SEE.....	89
4.1.3. Síntese das Características da TWD na Análise de Eventos... ..	93
4.2. DETECÇÃO DE EVENTOS.....	93
4.3. CLASSIFICAÇÃO DE EVENTOS.....	98
4.3.1. Primeira Etapa: Classificação Individual por Região.....	98
4.3.2. Segunda Etapa: Diagnóstico Final do Evento no SIN.....	106
4.4. LOCALIZADOR DE EVENTOS.....	107
4.5. ESTIMADOR DA MAGNITUDE DO EVENTO.....	108
4.5.1. Relação da Magnitude do Evento com a Resposta da Frequência.....	108

4.5.2. Relação da Magnitude do Evento com a TWD.....	117
4.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	120
5. RESULTADOS.....	123
5.1. AMBIENTE DE EXPERIMENTAÇÃO.....	124
5.1.1. Estudo 1 – Análise das Energias EWM e EWN.....	126
5.1.2. Estudo 2 – Análise das Energias EL e EH.....	132
5.1.3. Estudo 3 – Estimação da magnitude de eventos.....	138
5.1.4. Comentários Referentes à Análise <i>Off-Line</i>	140
5.2. AMBIENTE DE MONITORAMENTO EM TEMPO REAL.....	142
5.2.1. Evento 01: 19/05/2017 – Perda de carga.....	145
5.2.2. Evento 02: 14/02/2017 – Perda de carga.....	146
5.2.3. Evento 03: 12/02/2017 – Perda de geração.....	146
5.2.4. Evento 04: 27/02/2017 – Salto.....	147
5.2.5. Evento 05: 17/02/2017 – Ilhamento AC, RO e MT.....	148
5.2.6. Evento 06: 14/03/2017 – 3 eventos em sequência.....	149
5.3. PERFORMANCE.....	151
5.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	153
6. CONCLUSÕES.....	155
6.1. PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES.....	157
6.2. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	158
7. REFERÊNCIAS.....	159
APÊNDICE A – TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA.....	169
A.1. INTRODUÇÃO A TRANSFORMADA WAVELET.....	169
A.2. WAVELETS EM SEE.....	171
A.3. DESCRIÇÃO MATEMÁTICA.....	173
A.3.1. Fator de Escala e Fator de Translação.....	174
A.4. TRANSFORMADA WAVELET.....	175
A.4.1. Transformada Wavelet Contínua.....	175
A.4.2. Transformada Wavelet Discreta.....	177
A.5. PRINCIPAIS WAVELETS MÃE.....	180
APÊNDICE B – PSEUDO ALGORITMOS.....	183
B.1. DETECÇÃO DE EVENTOS.....	183
B.2. CLASSIFICAÇÃO DE EVENTOS.....	184
APÊNDICE C – EVENTOS UTILIZADOS NA SEÇÃO 4.3.....	185
APÊNDICE D – EVENTOS UTILIZADOS NA SEÇÃO 4.5.....	187
D.1. ESTIMAÇÃO DA MAGNITUDE DE EVENTOS COM A TAXA DE VARIAÇÃO DA FREQUENCIA MÉDIA DO SISTEMA.....	187
D.1. ESTIMAÇÃO DA MAGNITUDE DE EVENTOS COM A E_H MÉDIA DO SISTEMA.....	188

1. INTRODUÇÃO

Os *Sistemas de Energia Elétrica* (SEE) são complexos sistemas responsáveis pela geração, transmissão e distribuição da energia elétrica para as unidades consumidoras, com o objetivo de atender a demanda de carga de forma ininterrupta, seguindo critérios de confiabilidade, qualidade, segurança e economicidade. Estes sistemas estão sujeitos a diversos tipos de perturbações, que podem levar a atuação de proteções e desconectar segmentos do sistema, os quais podem ocasionar desequilíbrios entre a potência gerada e a consumida. Isso provoca oscilações na velocidade de rotação das máquinas síncronas que, por meio da ação de seus sistemas de controle, são amortecidas. Se as oscilações forem mal amortecidas, pode-se iniciar um efeito em cascata com a atuação de outras proteções ao longo do sistema, de tal forma que o sistema pode vir ao colapso, gerando blecautes.

Para que os critérios mencionados acima sejam atendidos é necessário que a ocorrência de eventos de grande porte no sistema seja minimizada. Quando existentes, devem ser devidamente eliminados pelos esquemas locais de proteção e, se necessário, ações de controle devem ser tomadas para que sua propagação seja evitada. Nesse sentido é importante para os operadores do sistema, que os eventos sejam detectados e identificados com rapidez para que suas consequências sejam reparadas por ações de controle realizadas pelo operador, restabelecendo o sistema a níveis seguros de operação.

A disponibilização deste tipo de instrumento requer que a dinâmica do sistema seja monitorada. No entanto, convencionalmente, o monitoramento é realizado por meio dos sistemas EMS (*Energy Management Systems*) e SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), cujas taxas de atualização dos dados variam entre dois a dez segundos, impossibilitando o monitoramento da dinâmica do sistema.

A modernização dos sistemas de monitoramento de SEEs se fez necessária e vem trazendo grandes avanços tecnológicos ao setor, possibilitando a introdução de novos conceitos, como as redes elétricas inteligentes (*Smart Grids*). De acordo com Falcão (2010), a expressão *Smart Grid* deve ser entendida mais como um conceito do que como uma tecnologia ou equipamento específico. Ela carrega a ideia da utilização intensiva de tecnologia de informação e comunicação na rede elétrica, por meio da possibilidade de comunicação do estado dos diversos componentes da rede. Assim, possibilita a implantação de estratégias de controle e otimização de forma muito mais eficiente que as atualmente em uso.

Uma das tecnologias que tem se destacado neste contexto de *Smart Grids* é a dos *Sistemas de Medição Sincronizada de Fasores* (SMSF). Os SMSF constituem uma das mais recentes tecnologias para o aprimoramento da operação dos sistemas elétricos. São sistemas capazes de realizar a medição direta e simultânea de grandezas elétricas (tensão e corrente) na forma de sincrofasores, ou seja, os fasores são medidos em diversos pontos distantes geograficamente do sistema, sincronizados em uma mesma base de tempo por meio de sinal GPS (*Global Positioning System*), com taxas de aquisição muito maiores que aquelas utilizadas pelos sistemas EMS/SCADA. Essa característica permite que a dinâmica dos sistemas elétricos seja monitorada (DOTTA et al., 2009b).

O desenvolvimento de ferramentas capazes de usufruir do potencial dos sincrofasores é um tema complexo e desafiante, sendo o principal motivador para o desenvolvimento deste trabalho. Dentre as aplicações dos SMSF, a análise automática de eventos é de grande interesse para pesquisadores e profissionais envolvidos com a operação dos SEE.

A ocorrência de eventos em SEEs causa alterações nos sinais de frequência, fase e módulo das tensões e correntes. O comportamento da dinâmica desses sinais apresenta características únicas que podem ser utilizadas e analisadas por metodologias de processamento de sinais e serem interpretadas.

1.1. ANÁLISE DE EVENTOS

A análise automática de eventos deve englobar as etapas de detecção do instante da ocorrência do evento, classificação quanto ao tipo, sua localização estimada e, caso haja desligamentos de blocos de carga ou geração, a estimação da magnitude do evento em MW.

Em SEEs com dimensões continentais, como o sistema brasileiro, é comum a ocorrência de eventos ao longo de um dia de operação. Entretanto, é necessário se fazer uma seleção de quais deles devem ser detectados e analisados. Eventos de pequeno porte não causam impacto na dinâmica do sistema e não apresentam riscos a sua estabilidade. Logo, os eventos de maior interesse para a operação do sistema são aqueles que afetam o sistema de maneira global, provocando a alteração nas grandezas elétricas medidas por diversas PMUs distantes geograficamente.

1.1.1. Detecção de Eventos

A etapa de detecção de eventos tem por objetivo identificar o instante em que a frequência calculada por cada PMU é afetada pela ocorrência de eventos. Vários métodos podem ser encontrados na literatura. Destacam-se os métodos que utilizam a taxa de variação da frequência (*Rate of Change of Frequency* – ROCOF), como foi empregado por Dong (2008) e Zhang (2014) no sistema norte americano FNET GridEye.

No caso do SMSF MedFasee BT, as medidas são feitas na baixa tensão, onde há maior quantidade de ruídos. Além disso, a medição em baixa tensão torna as grandezas elétricas suscetíveis às interferências de ocorrências na rede de distribuição, ocasionando, assim, falsas detecções. Uma alternativa encontrada é a utilização de filtros. Em Zimmer (2013), foram utilizadas três estratégias de detecção de eventos pela frequência: um Filtro Média Móvel utilizando a Taxa de Variação da Frequência (FMM-TV), um Filtro Média Móvel Passa Faixa (FMM-PF) e um Filtro de Kalman (FK). Entretanto, a utilização de filtros, para a detecção de eventos nas grandezas elétricas, pode esconder informações como a ocorrência de pequenas perdas de carga ou geração, curtos-circuitos e chaveamentos.

1.1.2. Classificação de Eventos

Classificar eventos significa identificar quais os tipos de anomalias, medidas pelas PMUs, ocorreram no SEE. A classificação deve ser feita de forma automática, logo após a detecção do evento, para que ações corretivas possam ser tomadas de maneira rápida.

Os sistemas de classificação se dividem em dois tipos: determinísticos e estatísticos. Os métodos determinísticos são criados por meio de Sistemas Especialistas que se baseiam em regras de lógica condicional. Deste modo, faz-se necessário um conjunto de comparadores com limiares estabelecidos, ajustáveis ou adaptativos. Este tipo de método de classificação é interessante quando não se possui grande quantidade de registros históricos de eventos.

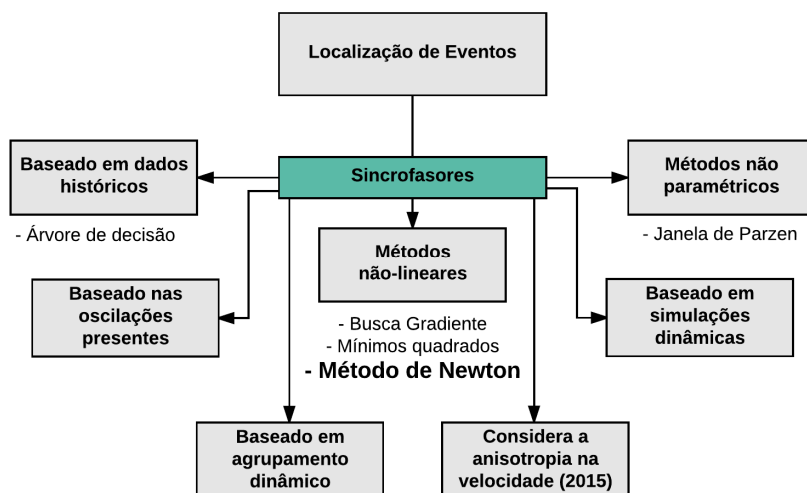
Há na literatura uma vasta quantidade de trabalhos utilizando métodos determinísticos para classificar eventos. O atual classificador utilizado no SMSF MedFasee BT, algoritmo desenvolvido em Zimmer (2013), é um sistema especialista baseado em lógica condicional, no qual, por meio de um conjunto de regras, os eventos são classificados em sobrefrequência, subfrequência ou salto.

Os sistemas de classificação estatísticos são compostos por métodos baseados no reconhecimento de padrões de registros históricos, requisitando uma grande quantidade destes para se obter bons índices de precisão. Dentre os métodos destacam-se os Discriminadores Lineares, Máquinas Kernel, Classificadores Bayesianos, Máquinas de Vetor de Suporte e Redes Neurais Artificiais (RNAs). Markham (2012) utilizou uma RNA para classificar eventos, em tempo real, em até 2 segundos após sua detecção. Os eventos foram classificados em perda de carga, perda de geração e desligamento de linha de transmissão, com uma eficácia de 97,7%. Zarzosa (2016) acrescentou mais um tipo de evento a RNA de Markham, classificando também eventos do tipo oscilação.

1.1.3. Localização de Eventos

O processo de localização de eventos consiste em estimar o local ou região mais provável que tenha ocorrido a perturbação. Em alguns casos, principalmente em eventos sistêmicos, a identificação da região onde ocorreu o evento não é simples. Assim, uma ferramenta que possa estimar sua localização de modo rápido, automático e preciso, agilizaria a tomada de decisões e a própria análise de perturbações. Na Figura 1.1 é apresentado um conjunto das principais metodologias utilizadas na localização de eventos utilizando sincrofasores.

Figura 1.1 – Métodos existentes na localização de eventos.



Fonte: Adaptado de ZARZOSA, 2016.

Tais metodologias utilizam o conceito da propagação das ondas eletromecânicas, ou seja, um evento eletromecânico que ocorra em um determinado ponto do sistema elétrico demora um tempo finito a se propagar por todo o sistema. Assim, diferentes PMUs vão registrar o início do evento em instantes distintos, sendo esta informação temporal utilizada na localização do evento.

Com o surgimento da tecnologia da medição fasorial e o desenvolvimento de sistemas de monitoramento de grandes áreas (*Wide Area Monitoring System* – WAMS), nas últimas duas décadas, foi possível confirmar que os transitórios eletromecânicos se propagam ao longo de todo o sistema com uma velocidade muito inferior à velocidade da luz (THORP et al., 1998). A primeira constatação dessa propagação foi feita em julho de 1993 durante uma rejeição de carga no Texas (ESMAEILIAN e KEZUNOVIC, 2016).

Em Thorp et al. (1998), o fenômeno da propagação de ondas eletromecânicas na rede elétrica é formalizado matematicamente por intermédio de um sistema de potência distribuído utilizando a equação de oscilação. Nesse artigo, foi proposto um modelo contínuo para um SEE de grande porte e uniforme e, então, a velocidade da propagação eletromecânica foi definida conforme a Equação 1.1:

$$v^2 = \frac{\omega \cdot V^2 \cdot \text{sen}(\theta)}{2 \cdot H \cdot |z|} \quad [\text{milha/s}] \quad (1.1)$$

onde:

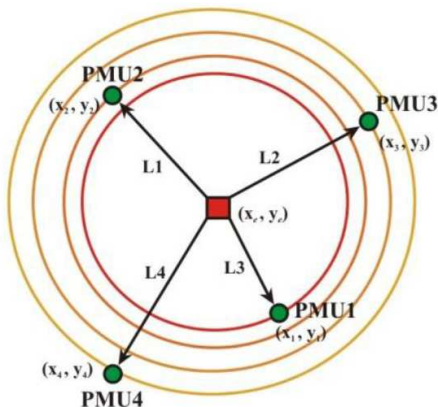
- ω : velocidade angular nominal [rad/s];
- V : magnitude de tensão no nó terminal da linha [p.u.];
- θ : ângulo da impedância da linha [rad];
- H : constante de inércia equivalente [s/milha];
- z : impedância da linha em [p.u./milha].

Um problema de triangulação pode ser criado com as informações da localização geográfica das PMUs e o tempo acumulado da chegada da frente de onda em cada PMU. No entanto, não se tem conhecimento do quão distante da primeira PMU afetada está o evento. O problema de triangulação é ilustrado na Figura 1.2.

Por meio da solução de um problema não-linear de triangularização é possível estimar o ponto/região, em um mapa, do provável local em que o evento ocorreu. As metodologias mais utilizadas para resolver este problema são o Método de Newton e o Método de Mínimos Quadrados. Tais metodologias foram empregadas

por Xia et al. (2007) e Zimmer (2013), utilizando coordenadas planas e, em Zarzosa (2016), com coordenadas geográficas.

Figura 1.2 – Problema de triangulação.



Fonte: XIA et al., 2007.

1.1.4. Estimação da Magnitude do Evento

Estimar a magnitude do evento significa estimar o montante de carga ou geração interrompida (em MW) que ocasionou o evento sistêmico. Este tipo de informação é de grande interesse na operação do sistema em tempo real, possibilitando que ações corretivas sejam realizadas com maior rapidez e eficácia.

Fazer a estimativa da magnitude auxilia, ainda, no processo de localização do evento. O algoritmo localizador, em conjunto com a magnitude do evento, pode, além de estimar a região da ocorrência do evento, auxiliar na identificação das possíveis plantas (unidades geradoras, centros de cargas ou LTs) responsáveis pela origem do evento sistêmico (DONG, 2008).

Na ocorrência de eventos do tipo perda de carga ou perda de geração, o sistema é submetido a uma resposta dinâmica lenta (da ordem de segundos) que pode ser vista como uma elevação ou decaimento na frequência de todo o sistema interligado. Esta resposta dinâmica da frequência fornece informações importantes que podem ser utilizadas para estimar a magnitude do evento.

Os principais métodos encontrados na literatura utilizam uma relação linear da magnitude da carga/geração interrompida com a

resposta da frequência na equação de oscilação da máquina síncrona. Nos trabalhos de Dong (2008) e de Xia et al. (2007) foi estabelecida uma relação com a variação da frequência entre os instantes pré-falta e pós-falta (regime permanente). Em Dong (2008), Terzija (2006) e Terzija e Koglin (2002), desenvolveu-se uma relação com a taxa de variação da frequência em simulações por meio de um algoritmo não recursivo do tipo Newton, fazendo o cálculo em poucos milissegundos (<300 ms) após a ocorrência do evento.

Em sistemas reais Dong (2008) utilizou a taxa de variação da frequência, dois segundos após a ocorrência do evento. Em Ashton et al. (2013), por sua vez, o tempo utilizado após a ocorrência de eventos foi de apenas 500 ms. No âmbito do SIN e do SMSF MedFasee BT, Zarzosa (2016) utilizou a taxa de variação entre o instante pré-falta e o ponto máximo da excursão da frequência (cerca de 4 segundos). Em Zimmer (2013) foi feita uma relação linear com a energia da componente principal da oscilação sistêmica, com frequência entre 0,03 e 0,05 Hz, encontrada pela Análise do Método de Prony (AMP).

1.2. TRANSFORMADA WAVELET

Todas as metodologias citadas anteriormente possuem suas vantagens e desvantagens, sendo a complexidade computacional envolvida para a aplicação em tempo real a principal desvantagem. Uma técnica de processamento de sinais que tem sido bastante destacada na literatura para aplicações em tempo real é a *Transformada Wavelet* (TW). A TW é uma importante ferramenta de processamento de sinais que surgiu como uma alternativa à *Transformada de Fourier* (TF), uma vez que o sinal analisado pode ser representado no domínio do tempo e da frequência, simultaneamente, podendo-se identificar as frequências existentes no sinal em seu respectivo instante temporal.

A TW é baseada em uma técnica com janelas de tamanho variável, permitindo a análise de informações de baixa e de alta frequência do sinal. Esta característica faz com que a TW possa ser aplicada para se analisar diversos tipos de comportamento de um sinal. Diferentemente da TF, que utiliza funções seno e/ou cosseno, na TW existem inúmeras funções wavelets, sendo que cada função é apropriada para uma aplicação em específico (voz, fotos, ultrassom, etc).

Segundo Avdaković e Čišija (2015), a TW é considerada como a técnica de processamento e análise de sinais mais promissora dentre todas as outras técnicas. Devido as suas características, ela tem sido aplicada em quase todas as áreas da ciência e, por isso, recebe o nome

de “Microscópio Matemático”. Fernández (2002) comenta que o primeiro uso da TW em sistemas elétricos foi feito no ano de 1994 e, desde então, sua utilização tem crescido de forma acelerada.

Há dois principais tipos de TW (apresentadas no Apêndice A), uma versão para sinais contínuos e a outra para sinais discretos. A versão contínua, denominada *Transformada Wavelet Contínua* (TWC), realiza uma grande quantidade de cálculos, exigindo grande esforço computacional e, ainda, muitas das informações obtidas são redundantes (REIS e SILVA, 2004). A *Transformada Wavelet Discreta* (TWD) é realizada por decomposições caracterizadas como uma *análise multiresolução* (AMR), que separa o sinal em várias bandas de frequência, representadas por coeficientes de aproximação (baixa frequência) e de detalhes (alta frequência).

A TWD mostra-se como uma excelente técnica para detectar o momento da ocorrência de discontinuidades nos sinais, como no caso de eventos em SEEs. Ela também é capaz de fornecer características de sinais associados à ocorrência de eventos, que podem ser utilizadas para fazer a sua classificação, localização e estimação da magnitude. Neste sentido, no presente trabalho, buscou-se explorar a utilização da TWD em todas as etapas da análise automática de eventos em tempo real.

Em Brustolin et al. (2012), a TWD foi utilizada para detectar os instantes da ocorrência de eventos de ilhamento e as etapas de atuação do ERAC (Esquema Regional de Alívio de Carga). Em Kim et al. (2015), a TWD foi utilizada nos sinais de frequência e de tensão para se realizar a detecção e a classificação automática de eventos utilizando a energia dos coeficientes de detalhe dos primeiros quatro níveis de decomposição. Deste modo, eventos abruptos, bem como eventos com resposta dinâmica lenta, são detectados eficazmente. Chen et al. (2015a) utilizaram a TWD para detectar o instante da ocorrência de eventos sistêmicos em SEE e aplicaram (CHEN et al., 2015b) em um sistema de grande área (sistema ocidental chinês).

A classificação de eventos baseados na TWD, utilizando métodos determinístico ou estatísticos, tem se intensificado bastante nos estudos com sinais elétricos, principalmente quando os eventos são relacionados à qualidade da energia elétrica (GAOUDA et al., 2002), ao tipo de falta em LTs (TORABI et al., 2012) e, mais recentemente, à classificação de eventos sistêmicos (CHEN et al., 2015a, CHEN et al., 2015b e KIM et al., 2015).

Em Kim et al. (2015) a energia dos coeficientes wavelet do sinal da tensão e da frequência foram analisados em tempo real no sistema elétrico coreano, contendo 34 PMUs, para identificar eventos de

potência ativa ou potência reativa. Os autores afirmam que eventos de potência ativa são detectados tanto pela análise da frequência quanto da tensão, enquanto que os de potência reativa são detectados apenas pela tensão. Todavia, verificou-se experimentalmente que para sincrofasores medidos em baixa tensão, como no caso do SMSF MedFasee BT, tal estratégia não se mostra adequada, pois alterações em cargas locais provocam saltos no módulo da tensão, provocando detecções errôneas de eventos.

Para fazer a localização, Kim et al. (2015) dividiu o sistema elétrico coreano em 4 zonas elétricas. Por meio da relação entre a energia dos coeficientes de detalhe da tensão e da frequência a metodologia identifica a zona e a provável PMU mais próxima dos eventos de potência ativa ou reativa. Entretanto, apenas os eventos de potência reativa apresentaram bons resultados, uma vez que os sinais de tensão medidos pelas PMUs mais próximas apresentavam altas energias. Os autores afirmaram em seu trabalho, que o processo de localização de eventos pela TW seria melhor estudado e detalhado em futuros trabalhos para a localização de eventos, tanto de potência ativa quanto reativa, em tempo real. Em Chen et al. (2015a e 2015b), a região cujo sinal apresenta a maior energia nos coeficientes de detalhe foi usado para indicar a região mais próxima ao evento.

Por fim, não foi encontrado nenhum trabalho com resultados expressivos na estimação da magnitude do evento por meio da TWD.

1.3. OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo geral o desenvolvimento de metodologias para a análise automática de eventos, em tempo real, utilizando sincrofasores e a transformada wavelet discreta (TWD). Desenvolveu-se metodologias para detecção de eventos em SEE, classificação quanto ao tipo do evento, localização do evento e estimação da magnitude do evento quando há perda de carga ou geração.

Inicialmente as metodologias foram implementadas em MATLAB para a validação metodológica em ambiente *off-line*, utilizando dados de eventos passados ocorridos no SIN e registrados pelo SMSF MedFasee BT. Em sequência, as metodologias foram implementadas em C# para a experimentação e validação com dados do SIN em tempo real.

As metodologias e os aplicativos desenvolvidos têm como premissa, também o uso acadêmico no âmbito do Projeto MedFasee/UFSC.

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação foi estruturada em 6 capítulos. No capítulo 2, inicialmente, é realizado uma abordagem referente ao Setor Elétrico Brasileiro e o Sistema Interligado Nacional (SIN). Evidencia-se a necessidade da inserção de novas tecnologias de monitoramento e controle para o SIN. Apresentam-se, assim, os principais conceitos relacionados aos SMSF, e por fim, descreve-se brevemente o Projeto MedFasee/UFSC e o SMSF MedFasee BT, sistema utilizado no presente trabalho, além de uma breve descrição do projeto de SMSF para o SIN, concebido pelo ONS.

No capítulo 3 são abordados os diferentes tipos de eventos que ocorrem em SEEs, ilustrando-se, por meio de gráficos, o comportamento da dinâmica das grandezas elétricas registradas pelo SMSF MedFasee BT.

No capítulo 4 são detalhadas as metodologias desenvolvidas para a análise automática de eventos. As etapas desenvolvidas se dividem em: 1) detecção; 2) classificação; 3) estimação da magnitude e; 4) localização da PMU mais próxima ao evento.

No capítulo 5 são apresentadas as implementações computacionais e os resultados obtidos com a aplicação das metodologias desenvolvidas, em dados de sincrofasores do SMSF MedFasee BT relativos ao monitoramento do SIN. Primeiramente, apresentam-se resultados obtidos em ambiente *off-line* e, por fim, resultados da aplicação em tempo real.

Por fim, no capítulo 6, são descritas as conclusões referentes aos conhecimentos adquiridos ao longo do desenvolvimento desta dissertação, bem como dos resultados obtidos com a aplicação em tempo real das metodologias desenvolvidas. Discorre-se sobre as possíveis melhorias que podem ser implementadas no algoritmo, bem como sobre sugestões para desenvolvimentos futuros.

2. SINCROFASORES NO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

Este capítulo tem por objetivo relacionar a operação de SEEs com as novas tecnologias de medição de grandes áreas. Inicialmente, descreve-se brevemente a organização do Setor Elétrico Brasileiro e o SIN, demonstrando a complexidade de operar um sistema deste porte e a necessidade da implementação de novas tecnologias de monitoramento.

Em sequência, descrevem-se brevemente os aspectos estruturais dos SMSF, seus tipos e suas respectivas aplicações na operação e controle de SEEs. Realiza-se, também, uma breve descrição das principais características do Projeto MedFasee/UFSC e do SMSF MedFasee BT, sistema utilizado ao longo do desenvolvimento e validação das metodologias desenvolvidas no presente trabalho.

Por fim, apresenta-se uma breve descrição do projeto de SMSF para o SIN (SMSF-SIN), ainda em fase de implementação.

2.1. A ORGANIZAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

A partir da década de 90, o setor de energia elétrica no Brasil passou por um processo de reestruturação. Até então o setor era composto por empresas predominantemente estatais, vinculadas diretamente às instâncias de governo estadual ou federal. Algumas empresas atuavam nos três segmentos, geração, transmissão e distribuição da energia elétrica até os consumidores finais. Neste tipo de mercado, em geral, não há competição e, por consequência, não há incentivos para a eficiência e investimentos por parte de empresas privadas.

O marco da reestruturação ocorreu quando, por falta de capacidade de investimento, se esgotou o papel do Estado investidor, por meio do estabelecimento de um novo modelo de mercado e da privatização de empresas do setor. Foi estabelecido um ambiente de competição no Mercado por meio da livre negociação da energia elétrica entre grandes consumidores e produtores. Essa transição se iniciou, formalmente, por meio da Lei de Concessões de Serviços Públicos (Lei 8.987, de 14 de fevereiro de 1995) e da Lei 9.074, de 19 de maio de 1995, estabelecendo as bases legais para a criação do Produtor Independente de Energia (PIE) e do Consumidor Livre (CL), bem como a obrigatoriedade de licitação para concessões de serviços públicos.

O Projeto de Reestruturação do Sistema Elétrico Brasileiro (RE-SEB), desenvolvido de agosto de 1996 a novembro de 1998, promoveu a (MME, 2001):

- desverticalização das empresas do setor (dividi-las nos segmentos de geração, transmissão e distribuição);
- competição nos segmentos de geração e comercialização de energia elétrica e;
- regulação dos setores de distribuição e transmissão de energia elétrica, considerados monopólios naturais, sob regulação do Estado.

Para gerenciar este novo ambiente foi identificada a necessidade de atribuir novas funções ao setor. Estas funções são, respectivamente:

- regulação do Mercado;
- operação do Mercado;
- planejamento do sistema e;
- operação independente do sistema;

Para regulamentar essas funções, um conjunto de leis foi criado, atribuindo a empresas a responsabilidade por tais funções. A seguir são apresentados de forma resumida, os dispositivos legais de instituição e os respectivos agentes criados.

• **Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)**: criada pela Lei 9.427, de 26 de dezembro de 1996. Tem por finalidade regular e fiscalizar a geração, a transmissão, a distribuição e a comercialização de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do Governo Federal.

• **Conselho Nacional de Política Energética (CNPE)**: presidido pelo Ministro de Estado de Minas e Energia (MME), é o órgão de assessoramento do Presidente da República para a formulação de políticas e diretrizes na área de energia. Seus princípios e objetivos na política energética nacional estão respaldados na Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997.

• **Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)**: criado pela Lei 9.648, de 27 de maio de 1998, regulamentado pelo Decreto 2.655, de 02 de julho de 1998, teve seu funcionamento autorizado pela Resolução nº 351, de 11 de novembro de 1998, da ANEEL. As atribuições, definidas por Lei são (Leis nº 9.648/1998 e nº 10.848/2004):

- planejamento e programação da operação e despacho centralizado da geração, visando a otimização do sistema;
- supervisão e coordenação dos centros de operação de sistemas elétricos;
- supervisão e controle da operação dos sistemas eletroenergéticos nacionais interligados e das interligações internacionais;
- contratação e administração de serviços de transmissão, do acesso à rede e dos serviços ancilares;
- proposição ao Poder Concedente das ampliações e reforços da Rede Básica de transmissão e;
- propor regras para a operação da Rede Básica de transmissão, a serem aprovadas pela ANEEL.

• **Administradora de Serviços do Mercado Atacadista de Energia Elétrica (ASMAE)**: criada em agosto de 1998, mediante o “Acordo de Mercado”. Empresa de direito privado, tem por responsabilidade todas as atividades relacionadas à administração do Mercado Atacadista de Energia (MAE), instituído na Lei 9.648/1998, incluindo as financeiras, contábeis e operacionais. Extinguiu-se com a criação da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) pela Lei 10.848/2004, nos artigos 4 e 5;

• **Comitê Coordenador do Planejamento da Expansão dos Sistemas Elétricos (CCPE)**: criado pelo Artigo 1º da Portaria nº 150 do MEE, de 10 de maio de 1999. Este agente, substituído pela EPE, em 2004, era o responsável pelos estudos de planejamento da expansão dos sistemas, que visam adequar a oferta de geração aos requisitos de demanda futura, observando os requisitos de confiabilidade do sistema.

O novo modelo estabelecido com as reformas descritas não garantiu a suficiente expansão da oferta de energia, levando o país a um grande racionamento em 2001. Entre os anos de 2003 a 2004, o Governo Federal lançou as bases de um novo modelo para o setor, sustentado pelas Leis nº 10.847 e 10.848, ambas de 15 de março de 2004, e pelos Decretos nº 5.163, de 30 de março de 2004, e nº 5.177, de 12 de agosto de 2004, definindo:

- a criação de uma instituição responsável pelo planejamento a longo prazo do setor, a **Empresa de Pesquisa Energética (EPE)**, substituindo o antigo CCPE. O Artigo 4º da Lei 10.847/2004, define 29 competências à EPE, que tem por finalidade prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinados a subsidiar o planejamento do setor energético, tais como energia elétrica, petróleo e gás natural e seus derivados, carvão mineral, fontes energéticas renováveis, eficiência energética, dentre outras.

- a criação da **Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE)**, no artigo 4 da Lei 10.848/2004, regulada e fiscalizada pela ANEEL. É uma instituição, sem fins lucrativos, com a finalidade de viabilizar a comercialização de energia elétrica de que trata essa Lei, sucedendo a antiga ASMAE.

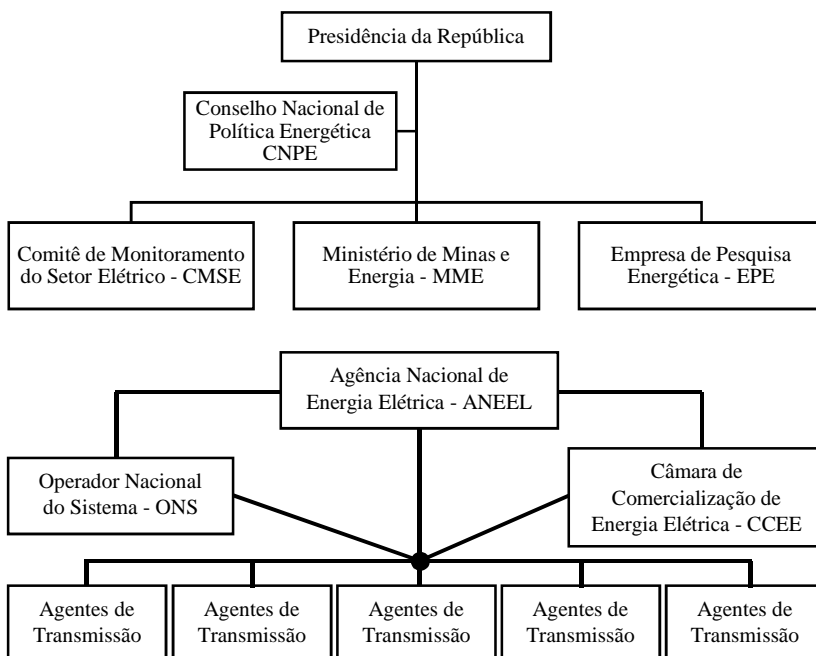
- a criação do **Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE)**, no Artigo 14 da Lei nº 10.848/2004, uma instituição com a função precípua de acompanhar e avaliar permanentemente a continuidade e a segurança do suprimento eletroenergético em todo o território nacional.

- a regulamentação da comercialização da energia elétrica, instituindo dois ambientes para a celebração de contratos de compra e venda de energia, o **Ambiente de Contratação Regulada (ACR)**, do qual participam Agentes de Geração e de Distribuição de energia elétrica, e o **Ambiente de Contratação Livre (ACL)**, do qual participam Agentes de Geração, Comercialização, Importadores e Exportadores de energia, e Consumidores Livres, conforme os parâmetros estabelecidos pela Lei nº 10.848/2004, pelos Decretos nº 5.163/2004 e nº 5.177/2004 e pela Resolução Normativa da ANEEL nº 109/2004.

Na Figura 2.1, apresenta-se o atual (2017) mapeamento organizacional das instituições do setor elétrico nacional. Em síntese, as atividades de governo são exercidas pelo CNPE, MME e CMSE. As atividades regulatórias e de fiscalização são exercidas pela ANEEL. As atividades de planejamento, operação e contabilização são exercidas por empresas públicas ou de direito privado sem fins lucrativos, como a EPE, ONS e CCEE. As atividades permitidas e reguladas são exercidas

pelos demais agentes do setor: geradores, transmissores, distribuidores e comercializadores.

Figura 2.1 – Instituições que dão corpo ao setor elétrico nacional.



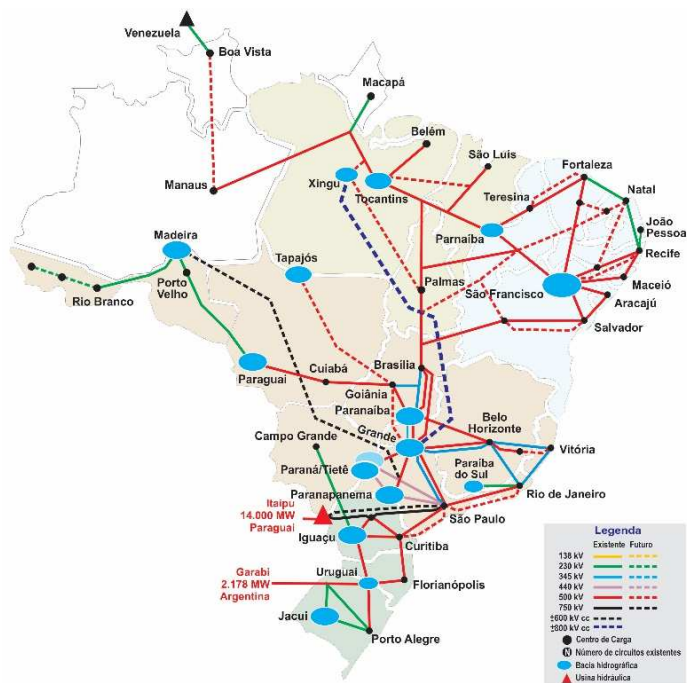
Fonte: adaptado de ABRADÉE, 2017.

2.2. O SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL - SIN

2.2.1. Aspectos Estruturais

No final do século XX (1999), ocorreu a interconexão dos sistemas de transmissão das Regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste e da Região Nordeste e parte da Região Norte. Com esta interconexão, o sistema elétrico brasileiro passou a ser todo interligado, denominado de *Sistema Interligado Nacional (SIN)*, com exceção de pequenos sistemas isolados, localizados principalmente na região amazônica. Na Figura 2.2 mostra-se a interligação Eletroenergética do Sistema Brasileiro relativo ao ano de 2015.

Figura 2.2 – Interligação Eletroenergética do Sistema Brasileiro.

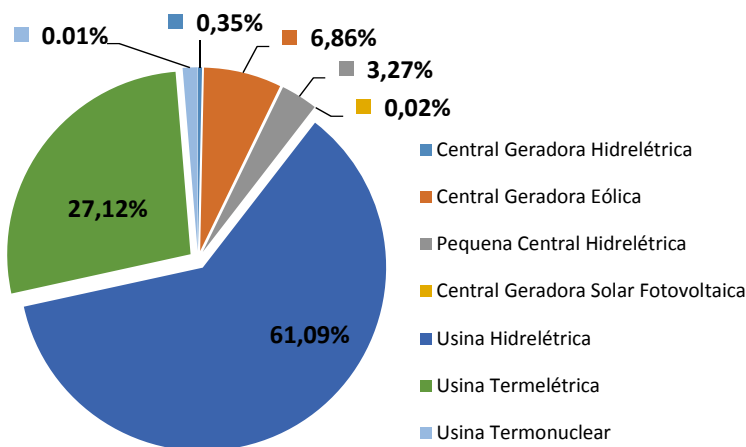


Fonte: ONS, 2016b.

O SIN é considerado um sistema único no mundo devido às suas características peculiares. Dispõe de uma matriz energética predominantemente renovável (~71,59%), sendo considerado um sistema hidro-termo-eólico de grande porte, com predominância hídrica, sendo esta responsável por 64,71% da potência instalada do país. As centrais hidrelétricas são classificadas em: 1) central geradora hidrelétrica (CHG), com até 1 MW de potência instalada; 2) pequena central hidrelétrica (PCH), entre 1,1 MW e 30 MW de potência instalada e; 3) Usina hidrelétrica de energia (UHE), com mais de 30 MW de potência instalada.

No Banco de Informações de Geração (BIG) de 2017, da ANEEL, consta que o Brasil possui no total 4.681 empreendimentos de geração em operação, totalizando 151.596.237 kW de potência instalada. Na Figura 2.3 mostra-se o percentual da potência instalada para cada tipo de fonte de geração.

Figura 2.3 – Potência Instalada (%) por Tipo de Geração.



Fonte: Adaptado de BIG, 2017 (Atualizado em: 08/04/2017).

Na Tabela 2.1 e na Figura 2.4 são apresentados pequenos históricos da evolução da capacidade de potência instalada nos últimos 5 anos, e da demanda de carga no SIN na última década.

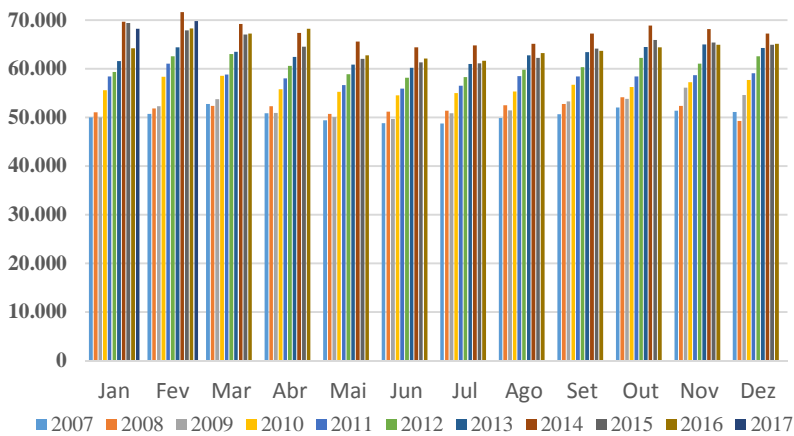
Por fim, na Tabela 2.2, são apresentados os dados relativos à extensão das linhas de transmissão (linhas de transmissão com tensões de 230 kV ou superiores) que constituem a chamada Rede Básica do SIN. Para melhor ilustrar a dimensão territorial abrangida, apresenta-se na Figura 2.5 um diagrama eletroenergético do Sistema de Transmissão da Rede Básica relativa ao horizonte de 2015.

Tabela 2.1 – Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil (MW).

Capacidade Instalada [MW]						
Período	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Total	120.974	126.743	133.913	140.272	147.727	152.042
Hidráulica	84.293	86.018	89.193	91.238	95.572	98.093
Térmica	32.778	36.528	37.827	39.393	40.814	41.342
Nuclear	2.007	1.990	1.990	1.990	1.990	1.990
Eólica	1.894	2.202	4.888	7.630	9.327	10.527
Solar	2	5	15	21	23	90

Fonte: Dados retirados da EPE, 2016, MME, 2016 e MME, 2017.

Figura 2.4 – Evolução Mensal da Carga em MWmed*.



*Megawatt médio – energia média no intervalo considerado. (1 MWmed em 1 ano corresponde à 8.760 MWh/ano).

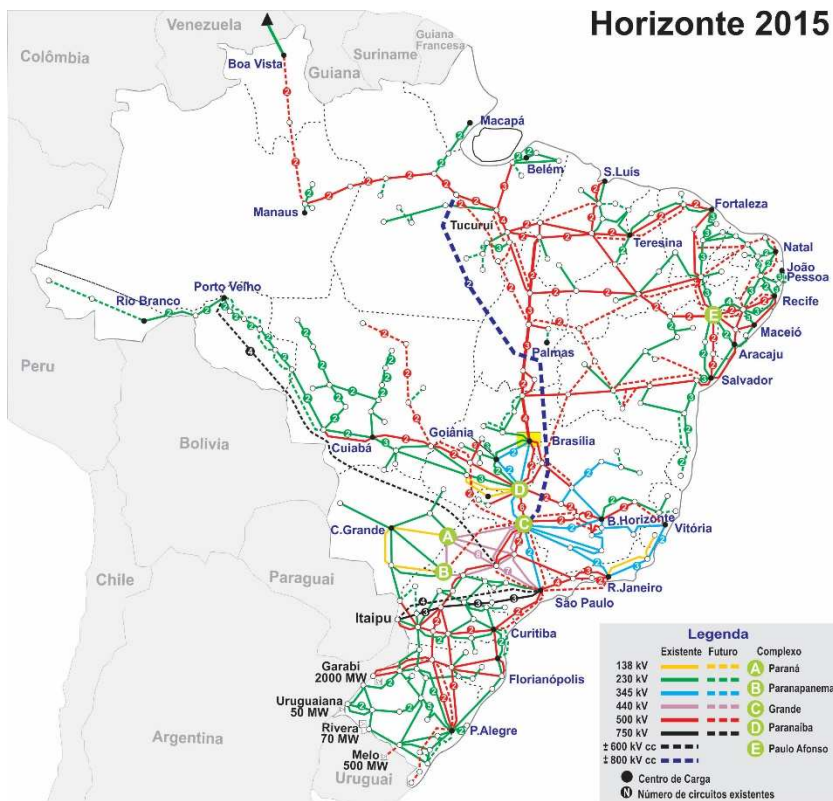
Fonte: Dados retirados da ONS, 2017a.

Tabela 2.2 – Linhas de Transmissão Instaladas no SIN até fevereiro de 2017.

Classe de Tensão [kV]	Linhas de Transmissão Instaladas [Km]			Total 2017 [%]
	2011	2014	2017	
230	45.708	52.450	55.885	41,3
345	10.062	10.303	10.320	7,6
440	6.681	6.728	6.748	5,0
500	35.003	40.659	46.813	34,6
600 CC	3.224	12.816	12.816	9,5
750	2.683	2.683	2.683	2,0
Total SIN	103.631	125.639	135.264	100

Fonte: Dados obtidos do MME, 2017 e ONS, 2017c.

Figura 2.5 – Mapa de Transmissão SIN, horizonte 2015.

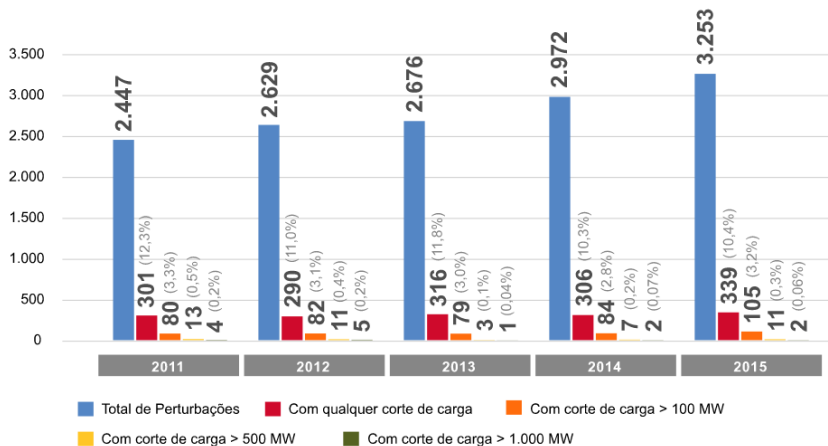


Fonte: ONS, 2016b.

2.2.2. Aspectos da Operação

A operação de um sistema de grande porte como o SIN, tomando-se como base as informações citadas referentes à capacidade instalada, demanda de carga e dimensão do sistema de transmissão, é uma tarefa complexa. Por ser um sistema de grande dimensão, a ocorrência de perturbações na rede de transmissão ao longo de um dia de operação é frequente. Na Figura 2.6 mostra-se a quantidade de perturbações registradas pelo ONS entre os anos de 2011 e 2015. Acrescenta-se, em específico, que em 2016, o número total de perturbações registradas foi de 3194, valor não incluído na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Evolução do número de perturbações e seu impacto sobre o SIN.



Os valores acima referem-se a perturbações que envolveram a Rede Básica. Os percentuais foram calculados com base no número total de perturbações.

Fonte: ONS, 2017e.

A operação do SIN é de responsabilidade do ONS, cujos principais estudos e ações realizados na operação coordenada e na administração dos serviços na Rede Básica são detalhados em 26 Módulos dos chamados Procedimentos de Rede. Tais procedimentos são documentos de caráter normativo elaborados pelo ONS, com a participação dos agentes, e homologados pela ANEEL. O Módulo 1 foi cancelado, conforme Resolução Normativa ANEEL 756/16, de 16 de dezembro de 2016.

O sistema deve ser capaz de atender os consumidores finais com confiabilidade, garantindo a continuidade de fornecimento e a qualidade da energia elétrica. Deste modo, o operador realiza atividades referentes ao estudo da segurança operacional, visando aumentar a capacidade do sistema de suportar contingências extremas, geralmente originadas por defeitos múltiplos ou em cascata. Para isso, deve-se trabalhar no sentido de minimizar as chances de ocorrência de uma perturbação de grande porte, restringir a propagação de distúrbios e agilizar ao máximo a recomposição das cargas.

Os instrumentos de monitoramento atual estão baseados na tecnologia dos sistemas EMS/SCADA. Devido à baixa taxa de atualização de dados, tais sistemas limitam a efetividade de alguns tipos

de ações restaurativas, relativas à propagação de grandes eventos, e a agilização na recomposição de cargas.

2.3. NOVAS TECNOLOGIAS DE MONITORAMENTO E CONTROLE PARA O SIN

Uma das novas tecnologias identificadas para o aumento da segurança do SIN é a implementação de um SMSF. Essa tecnologia permite a análise da dinâmica das grandezas elétricas, aumentando assim a observabilidade e a controlabilidade, criando uma nova janela de oportunidades para o desenvolvimento de novas e melhores ferramentas para a operação de SEE.

As tecnologias associadas à medição sincronizada de fasores já vêm sendo amplamente implementadas em diversos SEE pelo mundo. Hoje, já existem grandes sistemas em operação, como na China, Índia e na América do Norte, com cerca de 2000 PMUs instalados até 2015 (NUTHALAPATI; PHADKE, 2015).

No Brasil, o pioneirismo nos estudos envolvendo a medição sincronizada de fasores foi do Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina (LabPlan/UFSC), por meio do Projeto MedFasee/UFSC, descrito brevemente na Seção 2.3.2, sendo o ambiente onde se desenvolveu o presente trabalho.

O processo de instalação de um SMSF para o SIN já está em desenvolvimento desde 2013, por meio de projeto piloto desenvolvido em cooperação ONS-MedFasee/UFSC. No dia 02/02/2017 o ONS assinou contrato com a GE *Grid Solutions*, a qual foi selecionada por meio de processo licitatório (ONS, 2017c) para o fornecimento do sistema de concentradores de dados e de aplicativos de visualização, análise e apoio a operação.

O projeto, brevemente descrito na Seção 2.3.3, está sendo conduzido sob a coordenação do MME, no âmbito do Projeto META (Projeto de Assistência Técnica dos Setores de Energia e Mineral) e financiado pelo Banco Mundial (BIRD) (ONS, 2017b).

2.3.1. Sistemas de Medição Sincronizada de Fasores

A fase da tensão nas barras dos sistemas elétricos sempre despertou um interesse especial nos engenheiros de sistemas de potência, uma vez que o fluxo de potência ativa entre duas barras é praticamente proporcional ao seno da diferença angular entre elas. O

fluxo de potência ativa é uma informação importante nos estudos de planejamento e operação, aflorando, assim, o interesse dos engenheiros nos estudos referentes à medição da defasagem angular ao longo do sistema (PHADKE et al., 2008).

Este interesse foi evidenciado em meados da década de 80, quando três trabalhos (MISSOUT et al., 1980, MISSOUT et al., 1981 e BONANOMI, 1981) foram publicados fazendo o uso da medição da defasagem angular para fins de proteção. A utilização de fasores sincronizados a uma referência de tempo (sincrofasores) foi divulgada em Phadke et al. (1983). Em 1988 foi construída, pela *Virginia Tech*, a primeira PMU “moderna”, cujos cálculos dos fasores são sincronizados por meio de sinal GPS (PHADKE, 2002). As primeiras versões comerciais surgiram apenas em 1991, por meio de uma parceria entre a *Virginia Tech* e a Macrodyne Inc (PHADKE; THORP, 2008).

A medição sincronizada de fasores traz um novo paradigma para a operação dos SEEs, pois se tornou a principal técnica de seu monitoramento. Por meio de equipamentos de medição, conectados a relógios sincronizados por GPS, as medidas podem ser obtidas em locais distantes geograficamente, de forma sincronizada no tempo e com elevadas taxas de aquisição. Os SMSF possibilitam o desenvolvimento de ferramentas de monitoramento, controle e análise da dinâmica dos SEE, melhorando os processos de planejamento e operação do sistema.

A estrutura básica de um SMSF é constituída por PMUs distantes geograficamente, sincronizadas no tempo por um sinal GPS de alta precisão e conectadas via canais de comunicação a PDCs. Tais sistemas podem operar com taxas de medição de até 60 fasores por segundo, bem superiores às taxas utilizadas pelos sistemas SCADA, que são da ordem de 2 a 10 segundos para a atualização de todas as medidas. A seguir são detalhados os principais componentes de um SMSF.

• **Unidade de Medição Fasorial (PMU):** é composta por um receptor de sinal GPS, um sistema de aquisição (filtro e módulo de conversão A/D) e um sistema de processamento computacional. A PMU realiza a aquisição das tensões e correntes das barras e linhas, processa os dados amostrados, obtendo assim os fasores (módulo e ângulo) de tensão e corrente, calcula a frequência, a taxa de variação da frequência (ROCOF), formata os dados associados a uma etiqueta de tempo e os envia ao PDC (IEEE, 2011a).

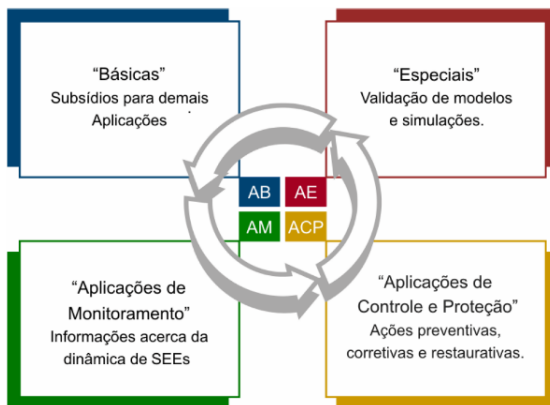
- **Concentrador de Dados Fasoriais**: tem a função de receber os sincrofasores, realizar tratamentos de erros de transmissão, correlacionar as etiquetas de tempo, armazenar os dados de forma centralizada e disponibilizar estes dados de forma contínua para aplicações em tempo real e *off-line*.
- **Canais de Comunicação**: meio utilizado para transferir os dados entre as PMUs e os PDCs ou entre PDCs. Pode ser por redes cabeadas como as linhas telefônicas, fibras ópticas e PLC (*Power Line Communications*) ou por redes não cabeadas como micro-ondas, satélites LEO (*Low-Earth Orbiting*) e *Internet* (VPN – *Virtual Private Network*). O protocolo de conexão mais indicado para sistemas em tempo real é o UDP/IP pela sua baixa latência e por suportar grandes fluxos de dados (IEEE, 2011b).

Os SMSF, constituídos a partir de dispositivos eletrônicos inteligentes (*Intelligent Electronic Device* – IED) que agregam funções de monitoramento, controle, proteção e automação dos SEE, possibilitam a formação de “sistemas de monitoramento de grandes áreas” (IEEE, 2011b). As principais aplicações dos SMSF, conforme apresentado na Figura 2.7, são, em geral, classificadas como aplicações básicas, de monitoramento, de controle e proteção e as aplicações especiais.

- **Aplicações básicas**: se referem à aquisição e tratamento dos dados fasoriais pelos PDCs, à visualização da dinâmica em tempo real, e ao registro sincronizado de dados de perturbações. As aplicações básicas servem como subsídio para as demais aplicações.
- **Aplicações de monitoramento**: trazem informações acerca da dinâmica dos SEEs, elas englobam a análise de oscilações eletromecânicas, estimação de estado híbrida e distribuída, monitoramento de estabilidade de tensão e do estado de operação dos geradores.
- **Aplicações de controle e proteção**: são responsáveis pela tomada de ações preventivas, corretivas e restaurativas. Fazem o controle de emergências, da geração distribuída e o controle para amortecimento de oscilações.

- **Aplicações especiais**: são compostas pela validação de modelos de simulação, pela estimação de parâmetros de LTs e pela localização de faltas e a análise de eventos.

Figura 2.7 – Classificação das aplicações de SMSF.



Fonte: SANTOS, 2008.

Há na literatura quatro principais tipos de tecnologias empregadas em sistemas de grandes áreas que surgiram de forma evolutiva (ANDRADE, 2008). Tais tecnologias são denominadas: WAMS, WAPS, WACS e WAMPACS, sendo a última um conjunto de todas as anteriores.

- **Wide Area Measurement System (WAMS)**: sistema de medição e monitoramento. Por meio de aplicativos desenvolvidos com interface homem-máquina (IHM), este sistema possibilita a disponibilização das informações de forma visual para os operadores, como por exemplo a plotagem das grandezas enviadas pelas PMUs, alarmes na ocorrência de eventos, informações sobre fluxo de potência, entre outros que auxiliam a operação em tempo real.

- **Wide Area Protection System (WAPS)**: evolução da WAMS, integram os sistemas de medição e monitoramento de forma coordenada com os sistemas de proteção permitindo a implementação de estratégias de controle de emergências e de medidas preventivas.

- **Wide Area Control System (WACS)**: evolução da WAMS, integram os sistemas de medição e monitoramento com o acionamento de elementos de controle, como os Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESP), equipamentos FACTS (Flexible AC Transmission Systems) e na modulação HVDC (High Voltage DC).

- **Wide Area Monitoring, Protection and Control System (WAMPACS)**: consiste na última evolução dos sistemas de grandes áreas, englobam as configurações das WAMS, WACS e WAPS.

Os desenvolvimentos de tecnologias para a análise de eventos, como realizado no presente trabalho, são necessários para WAMS. O aperfeiçoamento das metodologias possibilitará que no futuro as técnicas sejam aplicadas em conjunto com os sistemas de proteção e controle, alavancando o surgimento de WAMPACS.

2.3.2. O Projeto MedFasee/UFSC

Sistema Nacional de Medição Fasorial Sincronizada em Baixa Tensão para o Monitoramento e Estudos do Sistema Elétrico.

O projeto MedFasee/UFSC tem por objetivo o desenvolvimento, a disseminação e o uso acadêmico da tecnologia de medição sincronizada de fasores. Teve início em 2003 como um protótipo de WAMS com objetivo de monitorar o sistema elétrico da Região Sul para fins acadêmicos. As medições do projeto eram feitas nas tensões trifásicas da rede de distribuição (110-220V).

Neste primeiro protótipo as perturbações no sistema elétrico da região sul começaram a ser registradas, todavia, perturbações no restante do SIN também tinham registradas as suas respectivas repercussões no sistema elétrico da Região Sul. Tais resultados motivaram a expansão do sistema que, atualmente, conta com 25 pontos de medição instalados em universidades, abrangendo 20 estados, cobrindo as cinco regiões geográficas do país. Inclui-se ainda uma instalação de medição no Parque Tecnológico de Itaipu (PTI), cuja PMU foi desenvolvida pelo Instituto de Tecnologia Aplicada e Inovação (ITAI), medindo tensões e

PROJETO MedFasee
Monitoração do SIN em tempo real

Fasores de sequência positiva

Frequency: 59.9874 Hz Hora (UTC): 22:44:10 04/05/2017

Referência:

- UNIFAP, Macapá, AP
- UFPA, Belém, PA
- UFAM, Manaus, AM
- UFMA, São Luís, MA
- UFC, Fortaleza, CE
- UFT, Palmas, TO
- UFPE, Recife, PE
- UFAC, Rio Branco, AC
- UNIR, Porto Velho, RO
- UFBA, Salvador, BA
- UFMT, Cuiabá, MT
- UnB, Brasília, DF
- UNIFEI, Itajubá, MG
- UFJF, Juiz de Fora, MG
- UFMG, Belo Horizonte, MG
- UFMS, Campo Grande, MS
- COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ
- USP, São Carlos, SP
- UFRR, Curitiba, PR
- UFSC, Florianópolis, SC
- UNIPAMP, Alegrete, RS
- UFRGS, Porto Alegre, RS

• **aplicações básicas**: aquisição e tratamento de dados fasoriais (PDC), visualização da dinâmica em tempo real, registro sincronizado de dados de perturbações e análises de perturbações (DECKER et al., 2011b; BASTOS et al., 2013);

- **aplicações de monitoramento**: identificação e análise de oscilações eletromecânicas (LEANDRO et al, 2015; PRIOSTE et al., 2011);
- **aplicações de controle e proteção**: controle para amortecimento de oscilações (DOTTA, et al., 2009a; DOTTA, et al., 2009b);
- **aplicações especiais**: validação de modelos de simulação, estimação de parâmetros de linhas de transmissão e localização de faltas e eventos (GÓMEZ, et al., 2015; DECKER, et al., 2011c).

A partir de 2009, estabeleceu-se um processo de colaboração espontânea com o ONS para a utilização de registros do SMSF MedFasee BT na análise de perturbações no SIN (QUINTÃO et al., 2014). Em outubro de 2011, iniciou-se uma parceria formal UFSC/ONS, cuja parceria fez parte do Projeto Piloto do ONS. Com o uso das PMUs do SMSF MedFasee BT, o ONS fez a complementação de importantes análises de distúrbios, assim como do ilhamento e reconexão de subsistemas, de oscilações eletromecânicas no SIN, da otimização do desempenho de estabilizadores de sistemas de potência, entre outros. Com o uso do projeto piloto, o ONS obteve ganhos relacionados à capacitação da equipe técnica e uma melhor observabilidade do SIN (ONS, 2017c).

Além de dados de 22 PMUs do SMSF MedFasee BT, atualmente, o concentrador de dados do ONS (modelo openPDC), instalado no Rio de Janeiro, já recebe dados de algumas PMUs instaladas em subestações (SEs) de agentes de transmissão da rede básica, monitorando circuitos de alta tensão, sendo: 18 PMUs da CTEEP; 2 PMUs da CEMIG; 4 PMUs da ELETRONORTE; 6 PMUs da COPEL; 6 PMUs da TAESA; 6 PMUs da TBE e; 1 PMU da BRASNORTE (ONS, 2017c).

2.3.3. O Projeto de SMSF para o SIN (SMSF-SIN)

A implantação do SMSF-SIN tem por objetivo implantar uma estrutura de medição sincronizada de fasores robusta, com disponibilidade adequada e segura, incluindo-se ferramentas para aprimorar a qualidade da Operação em Tempo Real. Tais ferramentas tem por premissa (ONS, 2017c):

- permitir a análise do comportamento dinâmico do SIN, previsto no submódulo 11.6 dos Procedimentos de Rede, determinando as causas de distúrbios eletromecânicos, obtenção de subsídios para reajustes dos controladores das unidades geradoras, identificando novas medidas operativas, eventual necessidade de implantação de novos Sistemas Especiais de Proteção e validação de modelos eletrodinâmicos;

- disponibilizar ferramentas de apoio à tomada de decisão na Operação em Tempo Real, por meio da inclusão de medidas favoráveis nos sistemas EMS/SCADA e REGER (Rede de Gerenciamento de Energia: sistema de supervisão, controle e gerenciamento de energia) e;

- permitir a expansão e a evolução do projeto SMSF tendo sempre o estado da arte da aplicação de PMU nos concentradores de dados do ONS.

A implantação de sistema de medição sincronizada de fasores para o SIN foi recomendada pela Comissão de Análise do blecaute de 1999. Sua implantação está regulamentada na Resolução Autorizativa 170 da ANEEL, de 25 de abril de 2005, conforme o programa de melhoria das condições de segurança operacional do SIN, que visa a implementação de Esquemas Especiais de Segurança, como Esquemas de Controle de Segurança e proteções de caráter sistêmico, e de um Sistema de Oscilografia de Longa Duração.

No dia 16 de dezembro de 2016 foi aprovado pela ANEEL o Submódulo 11.8 – Sistema de Medição de Sincrofasores, dos Procedimentos de Rede, em vigor a partir de 01 de janeiro de 2017. Em sua Seção 5, definem-se as responsabilidades para o SMSF-SIN entre o ONS e os Agentes. As responsabilidades do ONS são (ONS, 2016c):

- coordenar a implantação do SMSF;
- implantar e manter a infraestrutura para os PDCs;
- definir os requisitos mínimos das PMUs;
- definir a localização das PMUs para obtenção de subsídios para a operação do SIN;
- informar aos Agentes sobre a indisponibilidade de Pacotes de Dados Computacionais de Sincrofasores nos PDCs do ONS;

- elaborar o Plano de Ação para a implantação das PMUs, onde devem estar definidos, em conjunto com os Agentes de operação, os prazos e o cronograma de implantação das PMUs e;
- acompanhar e registrar as não-conformidades relativas ao cumprimento, pelos Agentes de operação, dos prazos para implantação das PMUs estabelecidos no Plano de Ação.

As responsabilidades dos Agentes são (ONS, 2016c):

- definir, em conjunto com o ONS, os prazos e o cronograma de implantação das PMUs;
- adquirir e instalar as PMUs, em conformidade com os requisitos mínimos estabelecidos pelo ONS e obedecendo ao Plano de Ação para implantação das PMUs;
- prover toda a rede de comunicação de dados necessária para disponibilizar as medições fasoriais realizadas pelas PMU até o PDC do ONS e;
- transmitir os sincrofasores por meio de canais de comunicação dedicados até o PDC do ONS.

O projeto de instalação do SMSF-SIN está organizado em duas etapas. A primeira etapa prevê a instalação de medições em 31 subestações do SIN, pelos Agentes contemplados no projeto, totalizando 181 PMUs, atendendo todos os requisitos técnicos estabelecidos pelo ONS, cujo prazo final se estende até agosto de 2018. As localizações das subestações são ilustradas por estrelas na Figura 2.9. A segunda etapa, prevista para 2020, prevê a ampliação das instalações de medição para um total de 102 subestações, com aproximadamente 1000 PMUs instaladas, e a criação/evolução das implementações em tempo real.

No edital (ONS, 2014) publicado pelo ONS, listam-se as aplicações a serem implementadas tanto no âmbito da operação em tempo real, quanto de análises *off-line*. As aplicações em tempo real devem:

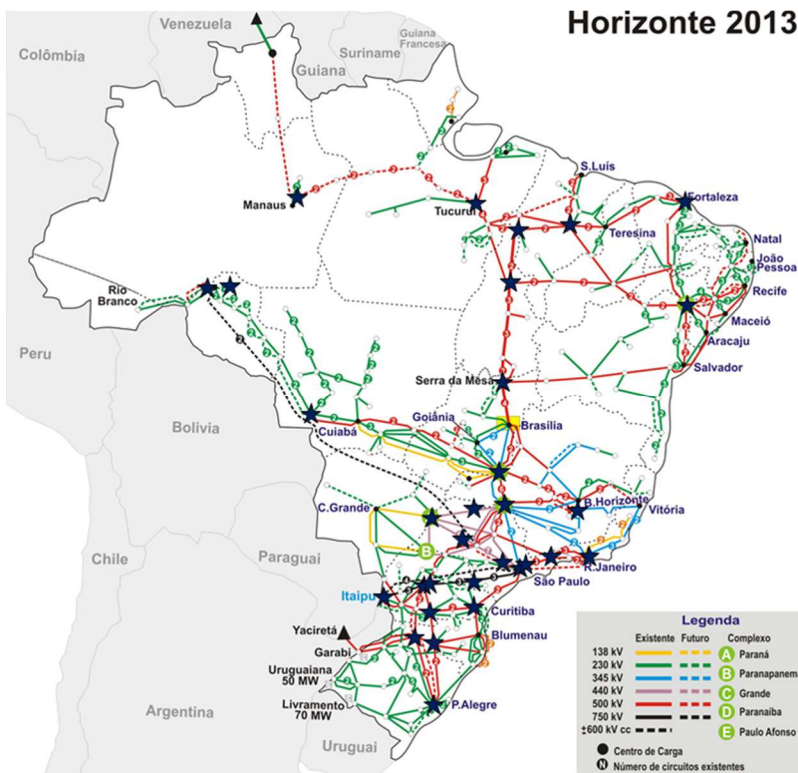
- monitorar a frequência;
- monitorar a tensão e corrente;
- monitorar o ângulo;
- monitorar o fluxo de potência;
- monitorar a estabilidade de oscilações;

- promover apoio à recomposição (indicação de ilhamento e desvios de frequência, condições de sincronismo, etc);
- detectar e localizar eventos (detectar e reportar a ocorrência de eventos, sugerindo o tipo do evento e sua provável localização geográfica) e;
- determinar os limites de transferência dinâmica.

As aplicações *off-line* devem permitir a:

- plotagem de gráficos;
- análise espectral;
- análise modal e;
- análise de eventos.

Figura 2.9 – Configuração inicial da implantação do SMSF-SIN.



Fonte: ONS (2017c).

Da descrição anterior, observa-se que o tema da presente dissertação é atual e está incluído nas especificações do ONS, relativamente ao projeto de SMSF para o SIN.

2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo realizou-se uma abordagem referente ao setor elétrico brasileiro, desde a sua reestruturação até os dias atuais, e do sistema interligado nacional, apresentando seus aspectos estruturais e da operação, cujas características tornam sua operação uma tarefa complexa.

O SIN é considerado um sistema de predominância renovável (~72%) com predominância hídrica (~64,71%) de dimensão continental. Possui cerca de 152 GW de capacidade de geração instalada e sua rede básica de transmissão possui mais de 135 mil quilômetros de linhas.

Evidenciou-se que um sistema deste porte está sujeito a diversas perturbações ao longo de um dia de operação (em 2016 foram 3194 registrados) e que há a necessidade da implementação de novas tecnologias de monitoramento para se controlar a propagação destas perturbações no sistema.

A medição sincronizada de fasores foi umas das tecnologias identificadas para a melhoria da segurança operacional e da confiabilidade do SIN. Já está em fase de implantação o projeto de um SMSF para o SIN pelo ONS, tendo o Projeto MedFasee/UFSC contribuído significativamente ao ONS por meio de um projeto piloto utilizando dados do SMSF MedFasee BT.

No presente trabalho as metodologias desenvolvidas se encaixam nas especificações do ONS para aplicações no âmbito da operação em tempo real, auxiliando na tomada de decisões em tempo real.

3. EVENTOS EM SEE

Este capítulo tem por objetivo apresentar os principais tipos de eventos que ocorrem em SEEs e as etapas que envolvem o processo de análise de eventos, por meio da utilização das grandezas elétricas provenientes de SMSF.

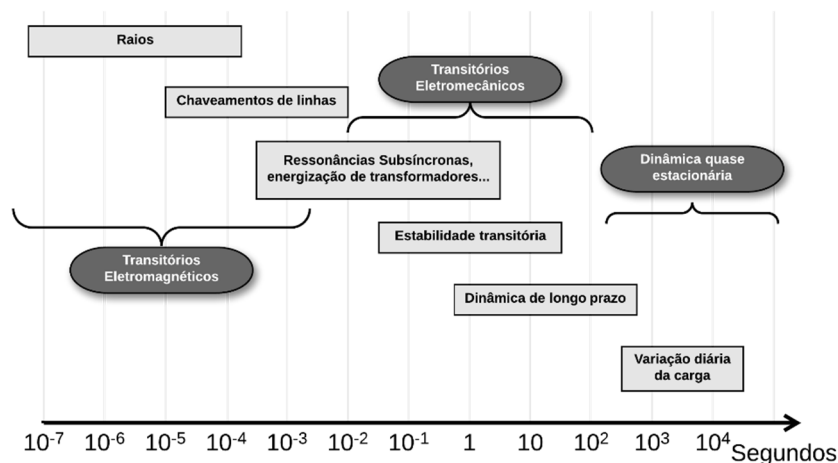
Primeiramente, são abordados alguns conceitos e definições relacionados ao estudo de eventos em SEE. Em sequência, são apresentados os principais tipos de eventos classificados, ilustrando-se, por meio de gráficos, o comportamento das grandezas elétricas (fase, módulo da tensão e a frequência). Todos os eventos apresentados neste capítulo ocorreram no SIN, cujos dados foram obtidos pelas PMUs do SMSF MedFasee BT. Ao final apresenta-se um quadro síntese dos eventos, destacando-se as principais grandezas elétricas utilizadas nas metodologias desenvolvidas no presente trabalho.

3.1. DEFINIÇÕES

Os SEEs estão sujeitos à ocorrência de variados fenômenos transitórios, enumerados de modo ilustrado em escala temporal na Figura 3.1. Esses fenômenos podem ser classificados em transitórios eletromagnéticos ou eletromecânicos. Os **transitórios eletromagnéticos** são extremamente rápidos causados pela abertura de linhas de transmissão, curtos-circuitos e descargas atmosféricas. Os **transitórios eletromecânicos** são eventos considerados lentos e têm como principal motivo o desequilíbrio de potências no sistema.

Evento em um SEE é qualquer fenômeno que acontece no sistema elétrico o qual ocasiona variações em grandezas elétricas, como a tensão e a frequência. No entanto, a ocorrência de eventos em SEEs é frequente, sobretudo em sistemas de grande porte como o SIN. Alguns eventos, geralmente aqueles causados por transitórios eletromagnéticos, degradam apenas a qualidade do sinal senoidal da tensão, causando impacto apenas nas regiões próximas ao local do evento, logo, são eventos rápidos denominados de **eventos locais**. Tais eventos não causam desbalanço na potência global do sistema e são observados com a presença de saltos na frequência (a causa desses saltos é explicada adiante), nas regiões afetadas. Assim, no presente trabalho os eventos locais são referidos como eventos do tipo salto.

Figura 3.1 – Fenômenos transitórios em Sistemas de Energia Elétrica.



Fonte: Adaptado de VANFRETTI, 2014.

Já os eventos causados por transitórios eletromecânicos, por afetar o equilíbrio de potência no sistema, pode desencadear a atuação de proteções em cascata, causando impactos maiores como cortes de carga, geração ou perda de sincronismo. Esses eventos de grande impacto são classificados como **eventos sistêmicos**.

Antes de se definir os tipos de eventos, deve ser apresentado o conceito de frequência, pois há diferenças entre a frequência associada à velocidade dos rotores das máquinas síncronas e a frequência calculada pelas PMUs. Segundo Bollen e Gu (2006), existem dois tipos de frequências. A primeira pode ser estimada com os parâmetros da tensão, que é calculada pelas PMUs, e a segunda é a frequência do sistema, que é a medida da velocidade de rotação das máquinas síncronas. As diferenças entre essas duas definições devem estar bem claras ao se analisar eventos.

Teoricamente, a velocidade de rotação das máquinas síncronas deveria ser igual em todas as máquinas interligadas no sistema, entretanto, há variações na velocidade entre as máquinas. Cabe destacar que a frequência do sistema é difícil de ser medida na prática e é utilizada somente em simulações. Já a frequência como parâmetro da tensão é a taxa de repetição da forma de onda da tensão medida, que pode ser considerada a mesma em qualquer parte do sistema (BOLLEN; GU, 2006).

A Equação 3.1 mostra que a frequência calculada por uma PMU, de acordo com a norma IEEE Std C37.118.1-2011, é função da fase da tensão em torno da frequência nominal do sistema,

$$f(t) = f_0 + \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} = f_0 + \Delta f(t) \quad (3.1)$$

onde:

f_0 : frequência nominal do sistema;

θ : defasagem angular da tensão à referência temporal do GPS;

Δf : desvio da frequência em relação à frequência nominal.

Na maior parte do tempo essas duas frequências são praticamente iguais, todavia diferem bastante, sobretudo, durante a ocorrência de eventos. Isto ocorre porque a frequência como parâmetro da tensão está sujeita às variações de fase no sinal da tensão durante eventos, introduzindo um pico no sinal da frequência. Tal comportamento é denominado como **salto**.

De acordo com os Procedimentos de Rede elaborados pelo ONS, referentes a perturbações no SIN (ONS, 2016c), o termo **evento** se refere a qualquer distúrbio que ocorre em SEE que venha a alterar os níveis de tensão e/ou frequência do sistema. O termo **perturbação**, por sua vez, refere-se a um conjunto de eventos que caracterizam um evento de grande impacto no SEE (ZIMMER, 2013). Embora sejam considerados pequenos eventos locais, os eventos de maior interesse neste trabalho são as perturbações de grande impacto (eventos sistêmicos) que podem ser causados por uma sequência de eventos (curtos-circuitos, chaveamentos, etc).

Ao longo de um dia de operação, a ocorrência de eventos em um SEE é frequente, ademais em sistemas extensos como o SIN, sendo o impacto destes eventos variados. O comportamento dinâmico do sistema é refletido nas grandezas elétricas, como na frequência e na fase e módulo da tensão. Desvios entre geração e carga resultam em mudanças na frequência do sistema, pois afetam diretamente a velocidade de rotação das máquinas síncronas.

De acordo com Kundur (1994), o comportamento da máquina síncrona durante a ocorrência de distúrbios pode ser descrito pela Equação de Oscilação da Máquina Síncrona, representada na Equação 3.2, considerando todas as variáveis em por unidade (p.u.).

$$\bar{J} \frac{d^2 \delta}{dt^2} + K_D \frac{d\delta}{dt} = \bar{T}_m - \bar{T}_e = \bar{T}_a \quad (3.2)$$

onde:

\bar{J} : Momento de inércia [p.u.];
 δ : Ângulo do rotor da máquina [p.u.];
 K_D : Constante de amortecimento mecânico [p.u.];
 \bar{T}_m : Torque mecânico [p.u.];
 \bar{T}_e : Torque eletromagnético [p.u.];
 \bar{T}_a : Torque acelerante [p.u.].

Durante a ocorrência de eventos, pode-se desprezar a constante de amortecimento, desta forma, a Equação 3.2 resulta:

$$\bar{J} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \bar{T}_m - \bar{T}_e = \bar{T}_a \quad (3.3)$$

Ao ocorrer um evento na rede elétrica que interfira no balanço de potência do sistema (perda de carga, perda de geração, desligamento de linhas de transmissão, entre outros) há alteração simultânea no valor da fase da tensão e na frequência das barras do sistema. E, ainda, as máquinas do sistema irão acelerar e desacelerar para reduzir o desbalanço de potência (DONG, 2008). Quando a geração excede a carga do sistema, a potência acelerante torna-se positiva e os geradores ganham velocidade, em contrapartida, quando a carga do sistema excede a geração, a potência acelerante torna-se negativa e os geradores perdem velocidade. Este equilíbrio não é instantâneo, resultando em distúrbios na fase da tensão que se propagam pela rede, em função do tempo e do espaço, com velocidade finita.

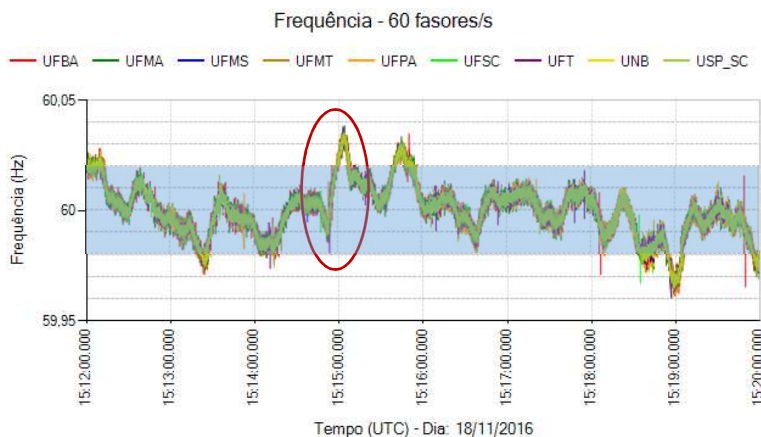
As barras próximas ao evento são as primeiras a sofrerem o impacto devido ao fenômeno da propagação eletromecânica na rede (THORP et al., 1998). A dinâmica desta propagação pode ser monitorada por meio da medição sincronizada de fasores. Tais oscilações podem desencadear a ocorrência de eventos em cascata, os quais pode levar o sistema elétrico ao colapso, com a ocorrência de grandes blecautes (ESMAELIAN; KEZUNOVIC, 2016).

Em teoria, o sistema deveria operar na velocidade síncrona (i.e. 60 Hz para o SIN), entretanto, o sistema opera sempre com variações na carga e na geração, acelerando e desacelerando as máquinas. Estas variações são controladas pelos sistemas de controle primário de velocidade, cuja constante de tempo é da ordem de alguns segundos (COSTA; TAKEMURA, 2006).

Essas flutuações na velocidade fazem surgir outro conceito, importante para o monitoramento dos SEE, a **oscilação natural da**

frequência no sistema. Essa oscilação é uma excursão da frequência dentro de uma banda, em torno de 0,02 Hz para o SIN, conforme ilustrado na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Oscilação natural da frequência em uma janela de 8 minutos com uma perda de carga às 15h14min53seg.



Nesta figura mostra-se a excursão da frequência em um período de 08 minutos relativo ao dia 18 de novembro de 2016. Durante este período, houve uma interrupção de 144 MW de carga em Porto Velho, no estado de Rondônia. Em vermelho é destacado o comportamento específico da frequência durante a ocorrência do evento. Devido à oscilação natural da frequência do sistema, a visualização desta ocorrência não é nítida, sendo difícil a sua distinção entre evento ou excursão da frequência. Portanto, são necessárias técnicas de processamento de sinais capazes de fazer essa diferenciação. O horário utilizado é referenciado ao Tempo Universal Coordenado (UTC).

3.2. TIPOS DE EVENTOS

Nesta seção são apresentados os principais tipos de eventos que ocorrem em SEE. Para o desenvolvimento desta abordagem utiliza-se de eventos reais registrados pelo SMSF MedFasee BT, cujo comportamento das grandezas elétricas (módulo e fase das tensões trifásicas das tomadas de baixa tensão (110 e 220 V) e a frequência calculada) é ilustrado por meio de gráficos. Os eventos utilizados foram enumerados conforme a seguir:

- **Evento 01**: 23/02/2017 - Abertura de uma LT, com baixo fluxo de potência, no estado de Santa Catarina;
- **Evento 02**: 24/11/2016 - Abertura de uma LT com a presença de uma grande oscilação entre as regiões Norte (PMUs UFAM e UFPA) e Nordeste;
- **Evento 03**: 01/11/2016 - Abertura de LT na região Acre/Rondônia;
- **Evento 04**: 23/10/2016 – Perda de 841 MW de carga devido à abertura da interligação Tucuruí – Manaus;
- **Evento 05**: 31/01/2017 - Abertura de circuitos 750 KV entre a UHE Itaipu – Tijuco Preto/SP;
- **Evento 06**: 26/10/2016 - Perda de 3200 MW de carga no SIN;
- **Evento 07**: 24/12/2016 - Perda de geração no SIN (magnitude não reportada);
- **Evento 08**: 26/10/2016 - Ilhamento nos estados do Acre e de Rondônia;
- **Evento 09**: 06/04/2016 - Ilhamento, por mais de 10 minutos, nos estados do Acre e de Rondônia;
- **Evento 10**: 28/11/2016 - Oscilação sustentada, por mais de 10 minutos, com origem nas regiões Norte e Nordeste.

3.2.1. Eventos do Tipo Salto

No presente trabalho, são denominados como saltos todos os eventos observados em SEEs que não afetam globalmente o equilíbrio de potência no sistema e, geralmente, afetam apenas as barras próximas do local da ocorrência do evento.

Os **curtos-circuitos** ocorrem quando há o rompimento do dielétrico entre uma fase e a terra ou entre duas ou mais fases, isso permite a circulação de correntes elevadíssimas, pois a corrente fica limitada praticamente apenas pela impedância da rede e da falta.

A ocorrência de curtos-circuitos geralmente sensibilizará relés de proteção que provocam chaveamentos, abrindo e fechando o disjuntor de uma ou mais linhas, desconectando-as por um intervalo de tempo muito curto, eliminando o evento e reestabelecendo a conexão. Em alguns casos, o evento permanece ao se reestabelecer a conexão e, então, a linha deverá ser desconectada em definitivo. Neste caso, reparos na rede elétrica podem ser necessários para que o fornecimento da energia elétrica seja restabelecido, uma vez que pode ter havido, por exemplo, o

rompimento de um cabo condutor. Dependendo do nível de tensão e do local da ocorrência do curto-circuito, seu impacto no sistema pode ser muito pequeno e afetar tanto o módulo e magnitude da tensão quanto à frequência apenas das barras próximas ao evento.

Na ocorrência de curtos-circuitos ou chaveamentos, a frequência apresenta saltos nas regiões próximas ao local da ocorrência do evento. É possível afirmar, então, que o evento ocorreu próximo às PMUs que registraram saltos na frequência, ou no caso de um curto-circuito, na região da PMU que registrar o maior impacto na frequência. Isso pode ser explicado considerando-se a Equação 3.1, visto que quanto mais próximo ao evento, maior será o efeito na tensão e, por consequência, maior o impacto na frequência da região.

Mudanças topológicas na rede ocorrem com bastante frequência, elas são causadas por fechamentos e/ou abertura de LTs e de transformadores de potência (TPs) que não causam significantes rejeições de carga ou perdas de geração. Como há a interrupção da transferência de potência entre pontos, é necessário que a potência seja redistribuída entre as demais linhas do sistema. Nestes casos, no instante do evento, as frequências nas PMUs próximas ao evento apresentam saltos, seguido por oscilações entre áreas do sistema (modos interáreas) ou entre usinas da mesma área (modos locais).

Nas Figuras 3.3 e 3.4, relativas ao Evento 1, apresenta-se o comportamento das grandezas elétricas relacionado à abertura de uma linha de transmissão, com baixo fluxo de potência, por um pequeno período de tempo, no estado de Santa Catarina, no dia 23/02/2017. A frequência e o módulo da tensão apresentam saltos no instante da abertura da LT. A abertura da linha de transmissão pode ser evidenciada ao se analisar a diferença angular, a qual a partir da abertura o ângulo se altera e, após o religamento, volta a operar no patamar posterior ao evento.

Outro exemplo é evidenciado no Evento 2, ocorrido no dia 24/11/2016, no qual a abertura de uma linha de transmissão provocou uma grande oscilação entre as regiões Norte (UFAM, UNIFAP e UFPA) e Nordeste (ONS, 2016a). A frequência ao longo deste evento é ilustrada na Figura 3.5.

Em alguns casos, onde o sistema possui poucas linhas de transmissão, este tipo de evento pode causar um efeito transitório maior devido ao desbalanço de potência entre as regiões do SIN. Este tipo de evento é ilustrado na Figura 3.6, sendo frequentemente observado na região Acre/Rondônia.

Geralmente, eventos deste tipo podem provocar outros eventos, como por exemplo, a perda de um bloco de geração ou de carga ou um ilhamento devido à abertura de uma linha de interligação entre áreas (ZIMMER, 2013).

Figura 3.3 – Frequência ao longo do Evento 1.

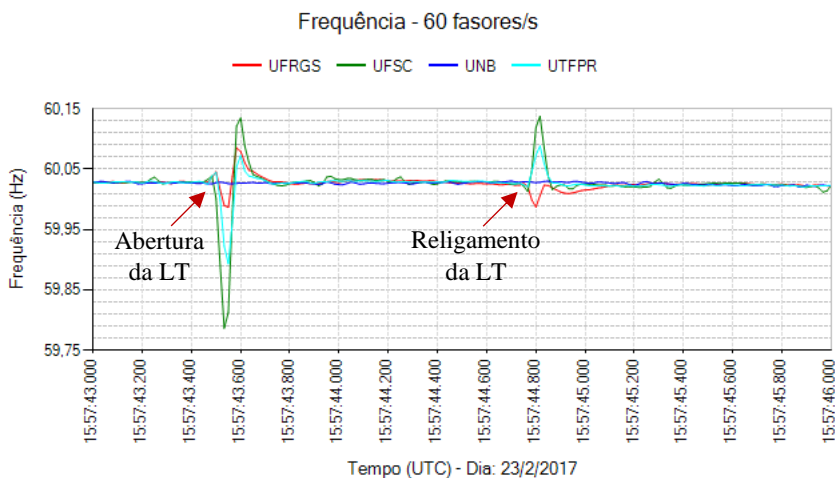
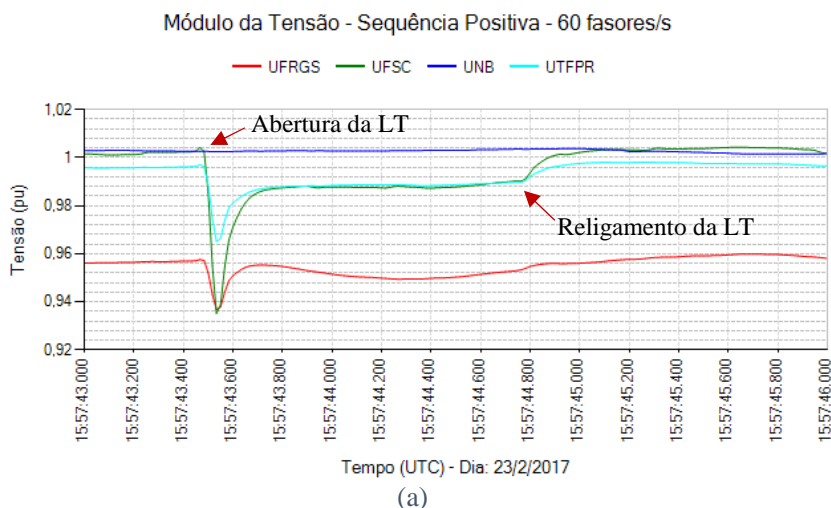
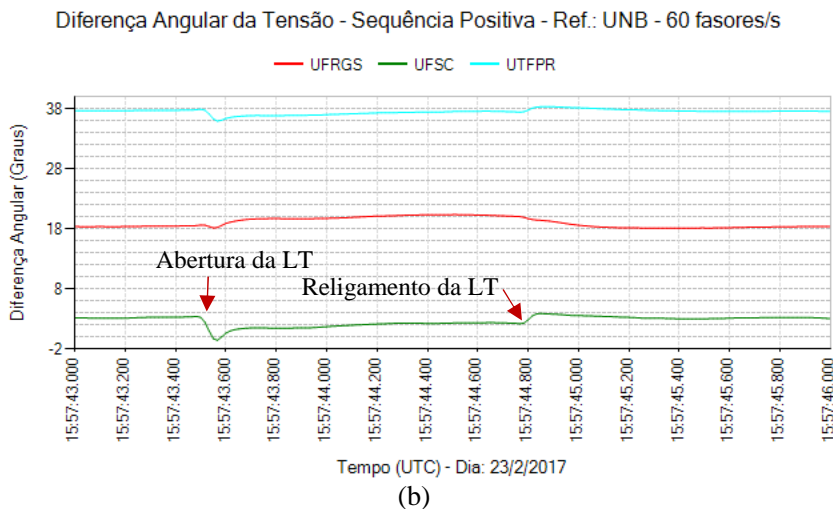


Figura 3.4 – (a) Módulo e (b) fase da tensão de sequência positiva do Evento 1.





Na Figura 3.7, apresentam-se registros do evento relativo à abertura da interligação Tucuruí – Manaus, ocorrido em 23/10/2016, às 17 horas e 28 minutos (Evento 4), deixando o Estado do Amazonas ilhado. Segundo o ONS (2016a), o evento provocou o desligamento total do sistema Manaus, no estado do Amazonas, que estava operando com cerca de 841 MW no instante do evento, sendo que 56% da carga era suprida por meio da interligação com o SIN.

Figura 3.5 – Oscilação da frequência do Evento 2.

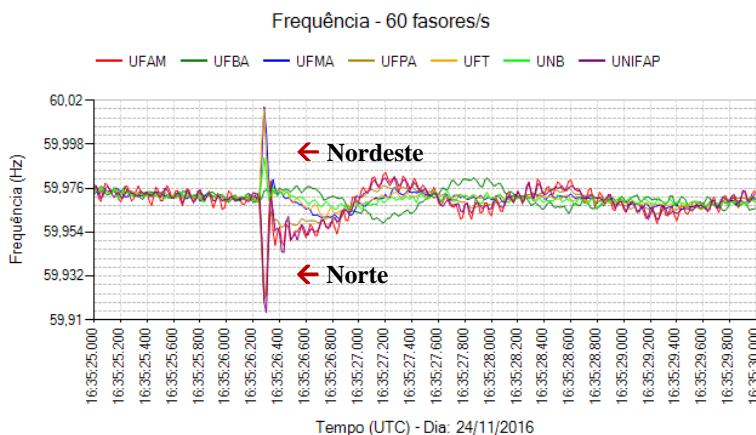
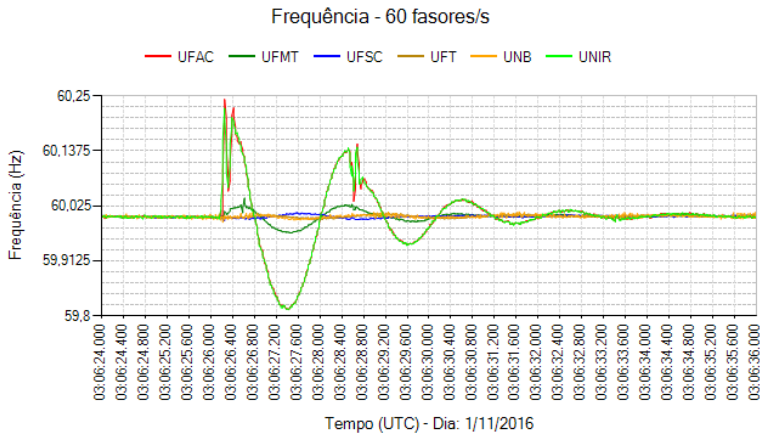
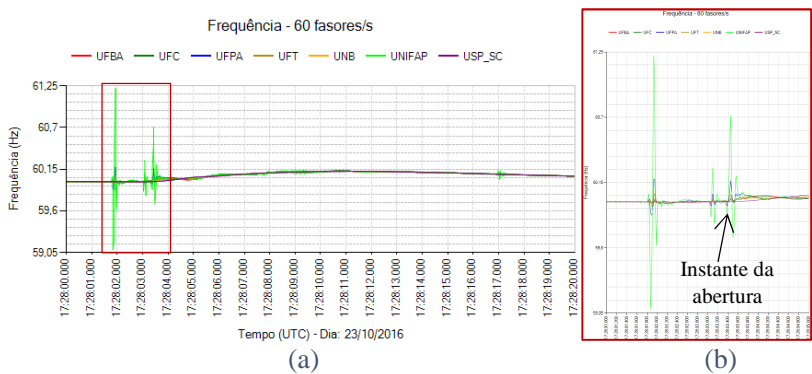


Figura 3.6 – Frequência na abertura do Evento 3.



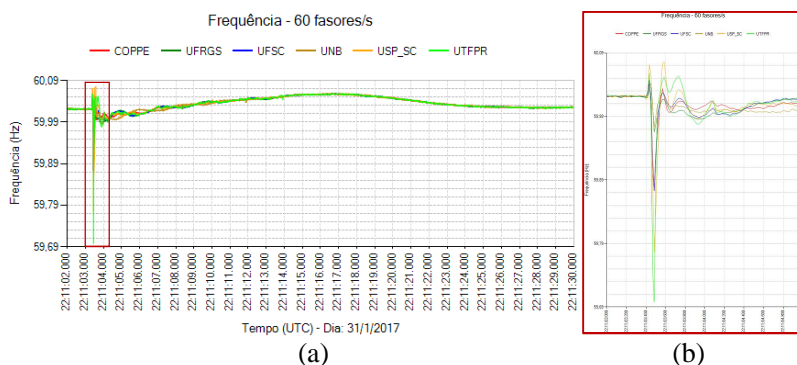
Observa-se na Figura 3.7 (b) que, antes da abertura da interligação, ocorreram dois saltos, visíveis principalmente na frequência da PMU UNIFAP (Amapá) e UFPA (Pará), pontos de ligação eletricamente próximos à linha de interligação com Manaus. A PMU instalada no Estado do Amazonas (UFAM) estava indisponível no momento da ocorrência do evento, caso contrário, o sinal da frequência no local apresentaria grandes variações e se afastaria da frequência do restante do sistema, devido ao ilhamento do Estado do Amazonas.

Figura 3.7 – (a) Frequência e (b) detalhe do instante inicial do Evento 4.



Há casos especiais em mudanças topológicas, como por exemplo, quando há a abertura de uma linha com expressiva transferência de potência entre duas áreas do sistema, como geralmente ocorre no caso de linhas de corrente contínua. A abertura dessas linhas provoca consideráveis mudanças no ponto de operação dos geradores de todo o sistema. Em alguns casos, existem esquemas de controle cuja atuação pode ocasionar afundamentos na frequência do sistema (ZIMMER, 2013), de modo que o comportamento da frequência se assemelha ao comportamento de uma perda de geração. Este caso é ilustrado na Figura 3.8, referente ao Evento 5 (abertura de circuitos de 750 kV entre a UHE Itaipu e a SE Tijuco Preto/SP, no dia 31/01/2017).

Figura 3.8 – (a) Frequência e (b) detalhe do instante inicial do Evento 5.



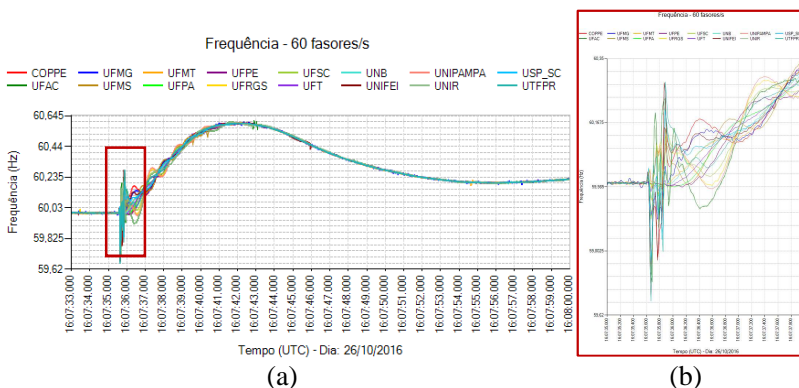
3.2.2. Eventos do Tipo Perda de Carga

Eventos do tipo perda de carga, geralmente, ocorrem devido a mudanças topológicas na rede causadas por chaveamentos e/ou abertura de linhas pela atuação de proteções como, por exemplo, curtos-circuitos ou subfrequência. Este tipo de evento é considerado sistêmico, pois seus impactos se alastram por toda a rede elétrica.

No dia 26/10/2016, às 16h07min, ocorreu o desligamento automático das linhas de transmissão em 345 kV Tijuco Preto/Baixada Santista, Tijuco Preto/Itapeti, Tijuco Preto/Ibiúna e Tijuco Preto/Leste, além do transformador TR4 (750/345 kV) da subestação Tijuco Preto (FURNAS). Em consequência houve redução de cerca de 3.200 MW na carga do SIN devido à atuação de proteções internas de consumidores em face da oscilação momentânea de tensão e frequência decorrente dos

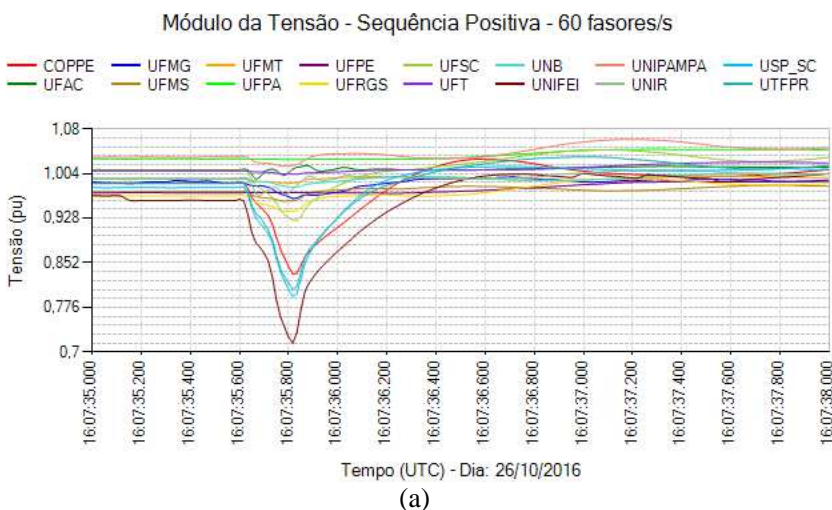
desligamentos (ONS, 2016a). O comportamento da frequência para este evento é apresentado na Figura 3.9.

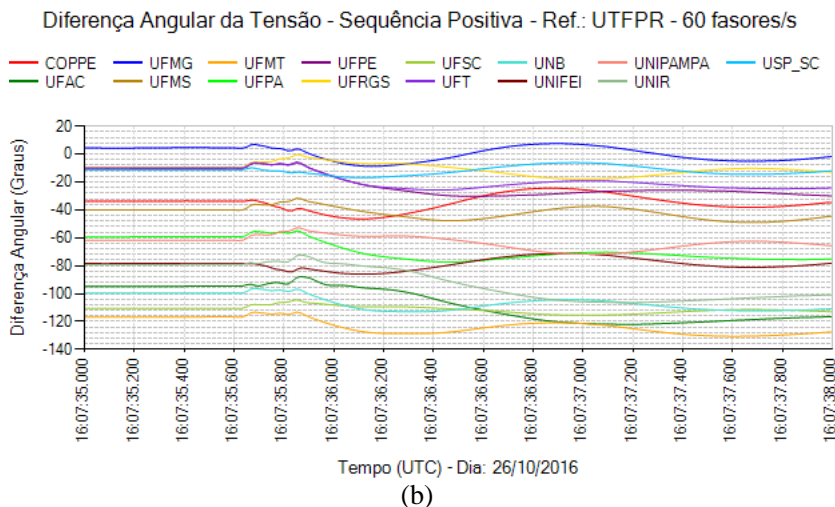
Figura 3.9 – (a) Frequência e (b) detalhe do instante inicial do Evento 6.



Pode-se observar pela Figura 3.9 (b) que no instante inicial do evento há saltos na frequência evidenciando, assim, que a causa primária da rejeição de carga foi um chaveamento de linha e/ou curtos-circuitos. É importante salientar que nem toda perda de carga apresenta saltos no instante inicial.

Figura 3.10 – (a) Módulo e (b) diferença angular da tensão do Evento 6.





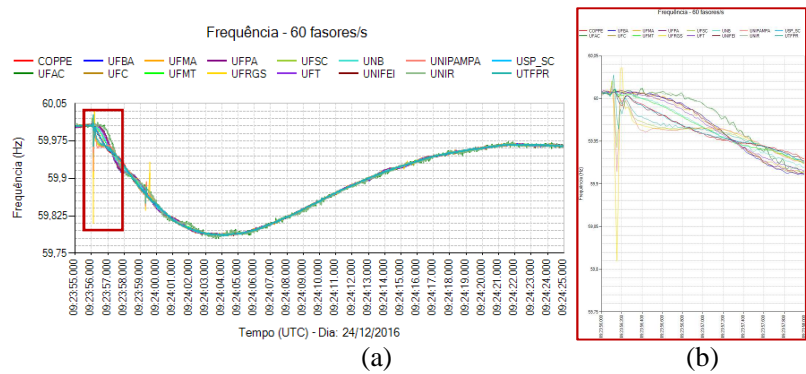
Na Figuras 3.10 apresenta-se o comportamento do (a) módulo da tensão e da (b) diferença angular ao longo do evento. É possível observar que o evento se propaga por todo o SIN e apresenta uma leve elevação no módulo da tensão, efeito típico de quando há redução de carga nas barras. A diferença angular, em contrapartida, apresenta um período oscilatório devido à interação entre as inércias das máquinas.

3.2.3. Eventos do Tipo Perda de Geração

Eventos do tipo perda de geração apresentam, nas grandezas elétricas, comportamentos inversos relativos aos da perda de carga. Na perda de carga, as máquinas síncronas aceleram fazendo com que a frequência se eleve. No caso da perda de geração, as máquinas perdem velocidade e por consequência a frequência decai.

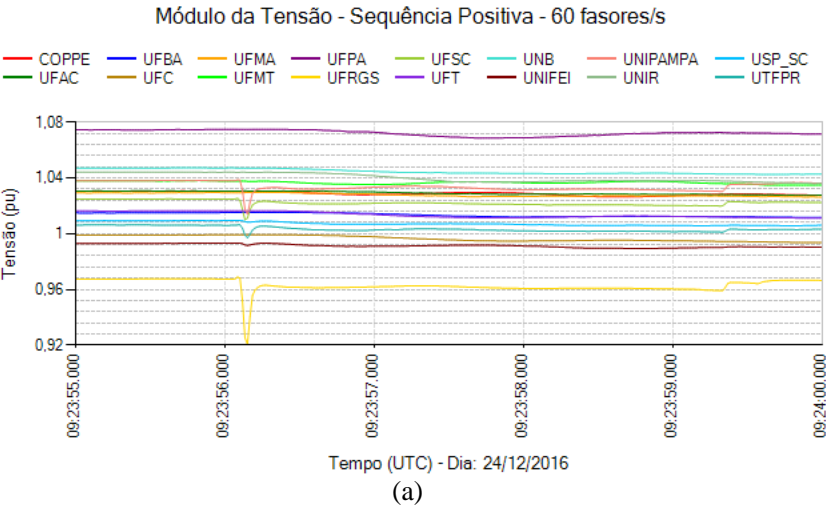
Na Figura 3.11, apresenta-se a frequência do SIN ao longo de uma perda de geração (Evento 7), cuja magnitude não foi reportada pelo operador do sistema. A ocorrência de saltos no início do evento se dá pelos chaveamentos ou abertura de linhas, entretanto, aparece somente nas barras próximas. É importante salientar que nem toda perda de geração apresenta saltos no instante inicial.

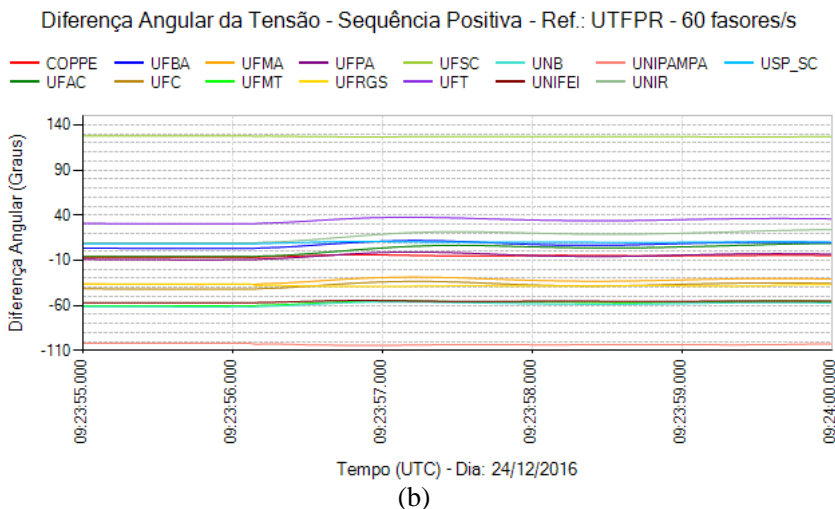
Figura 3.11 – (a) Frequência e seu (b) detalhe no Evento 7.



Na Figura 3.12, mostra-se o (a) módulo da tensão e a (b) diferença angular. As características são análogas à perda de carga, no entanto, ao invés de registrar um acréscimo na tensão pós evento, a tensão apresenta uma redução. Além disso, a diferença angular oscila com uma intensidade menor que a da perda de carga apresentada anteriormente, pois a magnitude deste evento foi, mesmo que desconhecida, muito inferior.

Figura 3.12 – (a) Módulo da tensão e (b) diferença angular do Evento 7.





3.2.4. Eventos do Tipo Ilhamento

Um ilhamento ocorre quando uma parte do SEE contendo carga e geração torna-se eletricamente isolada do restante do sistema. No entanto, em alguns casos, as ilhas formadas possuem grandes desequilíbrios de potência, o que pode levá-las ao colapso, acarretando em rejeições de carga e/ou perda de geração. O ilhamento pode ocorrer pela atuação de proteções locais de linhas de transmissão, que provocam a desconexão de uma linha de interligação devido a algum evento, como um curto-circuito. Pode ser ocasionado também, por esquemas especiais de proteção que visam manter a estabilidade do sistema quando uma região passa a operar fora de sincronismo ou esteja submetida a sucessivos distúrbios, gerando instabilidade angular.

Quando a frequência do subsistema ilhado se eleva à patamares específicos, a atuação do ERAC evita um colapso maior neste subsistema. O comportamento da frequência nos instantes de atuação de estágios do ERAC se caracteriza por pequenos saltos na frequência ao longo de seu decaimento.

Na Figura 3.13, apresenta-se um gráfico relativo a um ilhamento, ocorrido no dia 26/10/2016, do subsistema dos estados do Acre e de Rondônia com respeito ao restante do SIN (Evento 8). Como consequência do rápido decaimento da frequência, houve a atuação de 2 estágios do ERAC (58,5 Hz e 58,2 Hz), resultando na interrupção de 167 MW de carga, sendo 127 MW em Rondônia e 40 MW no Acre

(ONS, 2016a). Os estágios de atuação do ERAC relativos ao subsistema Acre-Rondônia vigentes estão apresentados na Tabela 3.1.

Figura 3.13 – Ilhamento da região AC/RO (Evento 8).

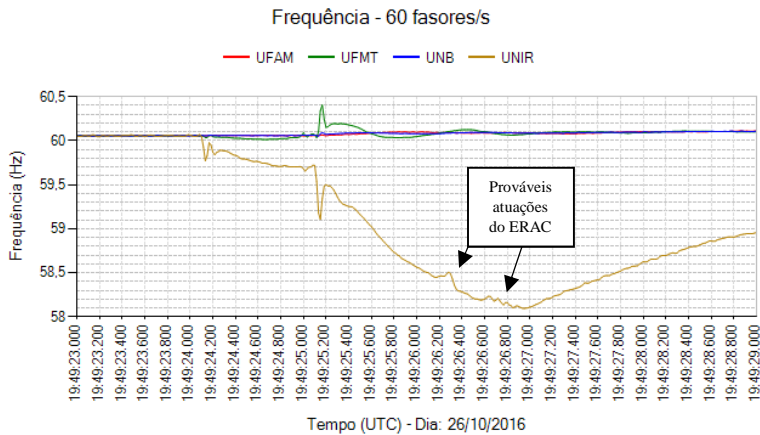


Tabela 3.1 - Ajustes do ERAC para a região Acre-Rondônia.

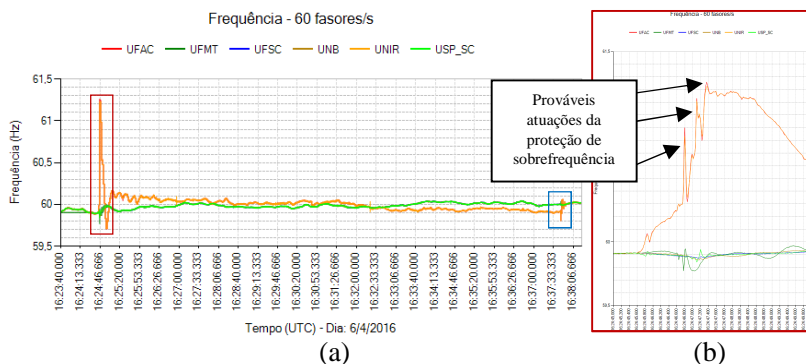
Acre-Rondônia		
Estágio	Ajuste (Hz)	Carga Rejeitada (%)
1º	58,5	15
2º	58,2	10
3º	57,9	10
4º	57,7	10
5º	57,5	10

No caso de sobrefrequência, há proteções semelhante ao ERAC, as quais, por meio de patamares específicos, comandam a desconexão de unidades geradoras fazendo com que a frequência volte a operar em níveis seguros. A atuação desse tipo de esquema de proteção pode ser observada na Figura 3.14 (b), com a presença de pequenos saltos durante a excursão da frequência.

Na Figura 3.14 é ilustrado um ilhamento no SIN, no qual a região AC/RO ficou por mais de 14 minutos operando de maneira isolada em relação ao restante do sistema (Evento 9). Observa-se um grande salto nas frequências registradas nas PMUs UNIR e UFAC, que em seguida

passam a operar separadamente do restante do sistema, evidenciando a abertura de todos os circuitos de interligação entre o subsistema Acre/Rondônia e o restante do SIN.

Figura 3.14 – Frequência ao longo do Evento 9.



Na Figura 3.14, é destacado em vermelho o instante inicial do ilhamento e, em azul, o instante de reconexão. Na Figura 3.15 é apresentado o (a) módulo e (b) a diferença angular no instante inicial. Na Figura 3.15 (a) a interligação se abriu entre Cuiabá/MT e Porto Velho/RO, assim, notam-se variações abruptas nas tensões medidas nestes locais. Na Figura 3.16 (a) o impacto no instante de reconexão é menor pois ocorreu o desligamento de grande parte da geração na região ilhada.

A diferença angular entre o sistema interligado e o sistema ilhado possui um comportamento diferenciado. Quando dois sistemas operam de modo ilhado, a diferença angular entre eles tende a crescer indefinidamente, conforme Figura 3.15 (a). No entanto, os valores estão representados na faixa entre -180° e $+180^\circ$ (IEEE Std C37.118.1-2011). Ao reconectar o subsistema ilhado ao restante do sistema, a diferença angular volta a operar de forma síncrona, conforme a Figura 3.16 (b).

Figura 3.15 – Módulo da tensão e diferença angular no instante inicial do Evento 9.

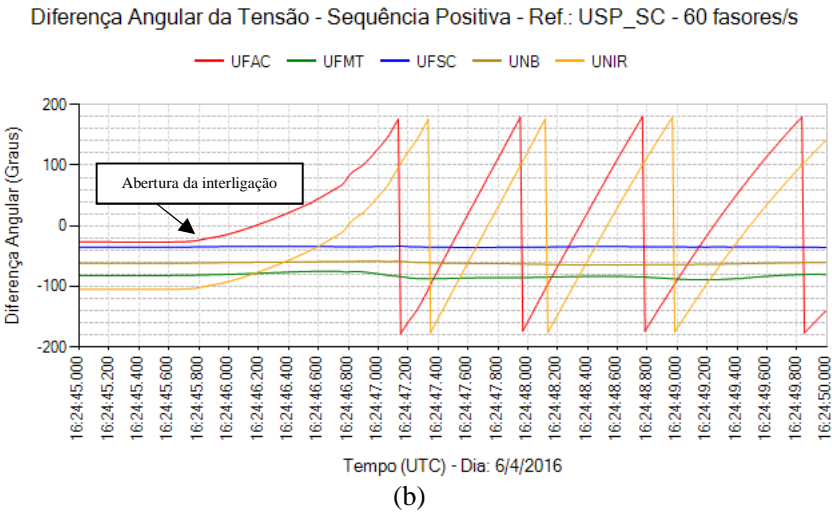
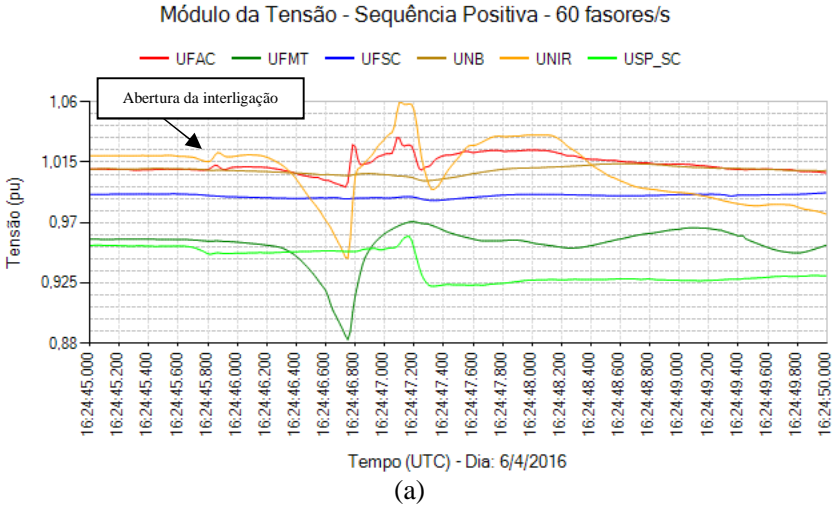
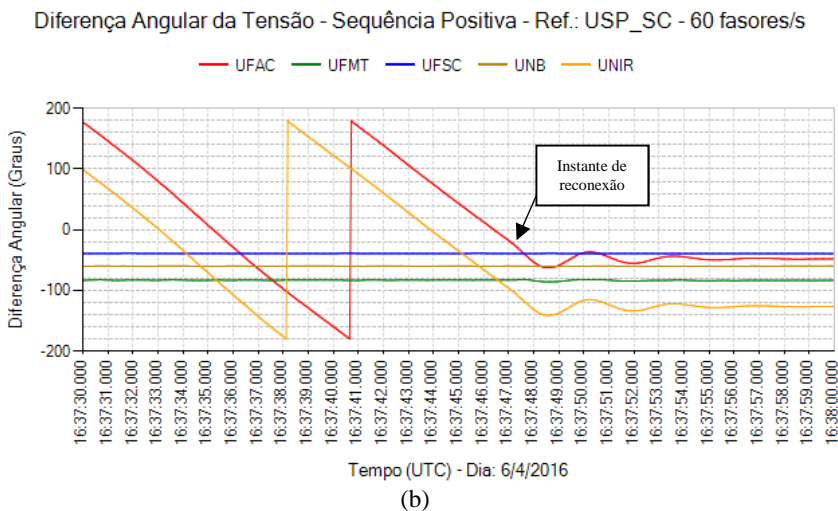
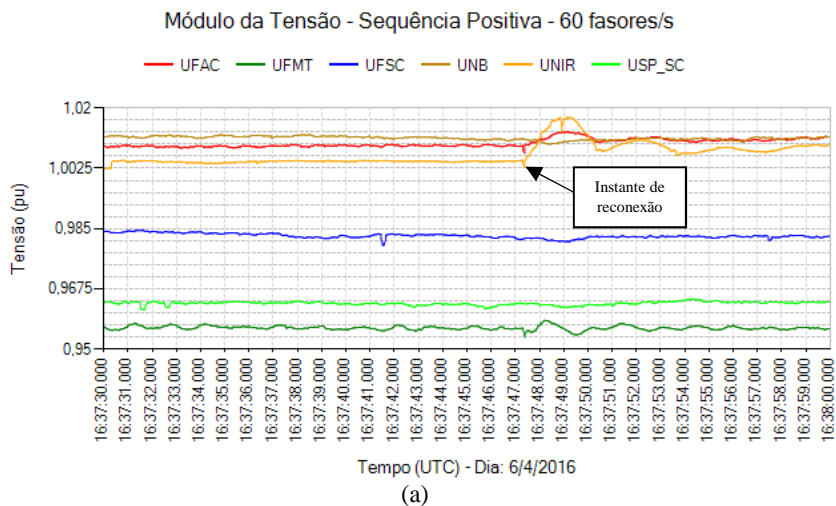


Figura 3.16 – Módulo da tensão e diferença angular no instante de reconexão do Evento 9.



3.2.5. Eventos do Tipo Oscilações Sustentadas

Oscilações eletromecânicas de baixa frequência em grandes SEEs podem induzir a ocorrência de outros distúrbios. A ocorrência de oscilações é um fenômeno comum e pode aparecer em maior escala após a ocorrência de distúrbios como mudanças na carga, geração, topologia da rede, ações de controles ou por causas naturais. Tais oscilações podem ser perigosas à estabilidade do sistema se não forem bem amortecidas.

Algumas dessas oscilações podem excitar modos oscilatórios de baixo amortecimento que perduram no sistema. Tais oscilações têm origem nas oscilações eletromecânicas das máquinas síncronas do sistema e podem ocorrer entre máquinas da mesma usina (intra-planta, 2-3 Hz), da mesma área (locais, 1-2 Hz), ou de diferentes áreas (interáreas, 0,1-1 Hz) do sistema.

Sistemas bem malhados (com grande quantidade de linhas de transmissão) e com baixo carregamento tendem a apresentar modos oscilatórios locais de mais alta frequência (intra-planta ou locais), já sistemas pouco malhados e com alto carregamento tendem a apresentar modos oscilatórios de mais baixa frequência (interáreas). O controle de modos oscilatórios mal amortecidos pode ser feito por intermédio da utilização de Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESP), que amortecem as oscilações por meio do controle da excitação dos geradores.

Na Figura 3.17, referente ao Evento 10, apresenta-se o comportamento da frequência durante uma oscilação sustentada que ocorreu no dia 28 de novembro de 2016, por mais de 10 minutos, até ser eliminada pela desconexão de uma unidade geradora. Os detalhes da frequência, módulo da tensão e a diferença angular são mostrados na Figura 3.19. Aplicando-se a Transformada Discreta de Fourier (DFT) (LYONS, 2010) a esses sinais obteve-se uma frequência de oscilação de 1,28 Hz, conforme apresentado na Figura 3.18.

Geralmente, não há a presença de saltos na frequência no instante da ocorrência de um evento de oscilação sustentada. Neste caso, observa-se no período inicial das oscilações que ocorreu um salto registrado na UNIFAP.

A tensão oscila ao longo do tempo e as PMUs da UNIFAP e UFPA registraram um salto na tensão no instante em que há uma alteração em seu nível, provocado por algum controle ou chaveamento, que são refletidos na frequência. Já a diferença angular apresenta apenas oscilações ao longo do tempo.

Figura 3.17 – Frequência durante o Evento 10.

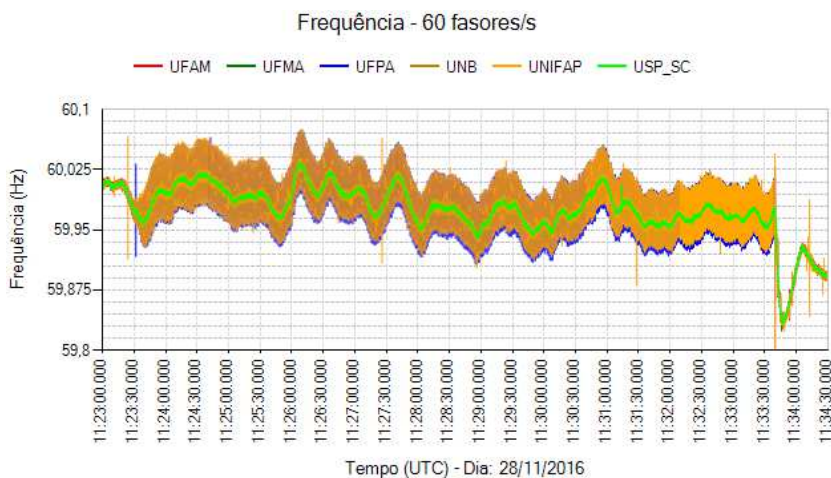


Figura 3.18 – Espectro de frequência durante o Evento 10.

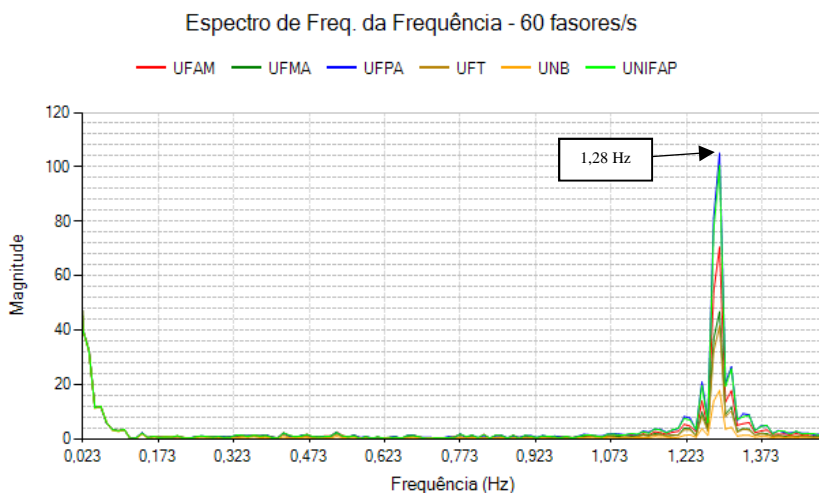
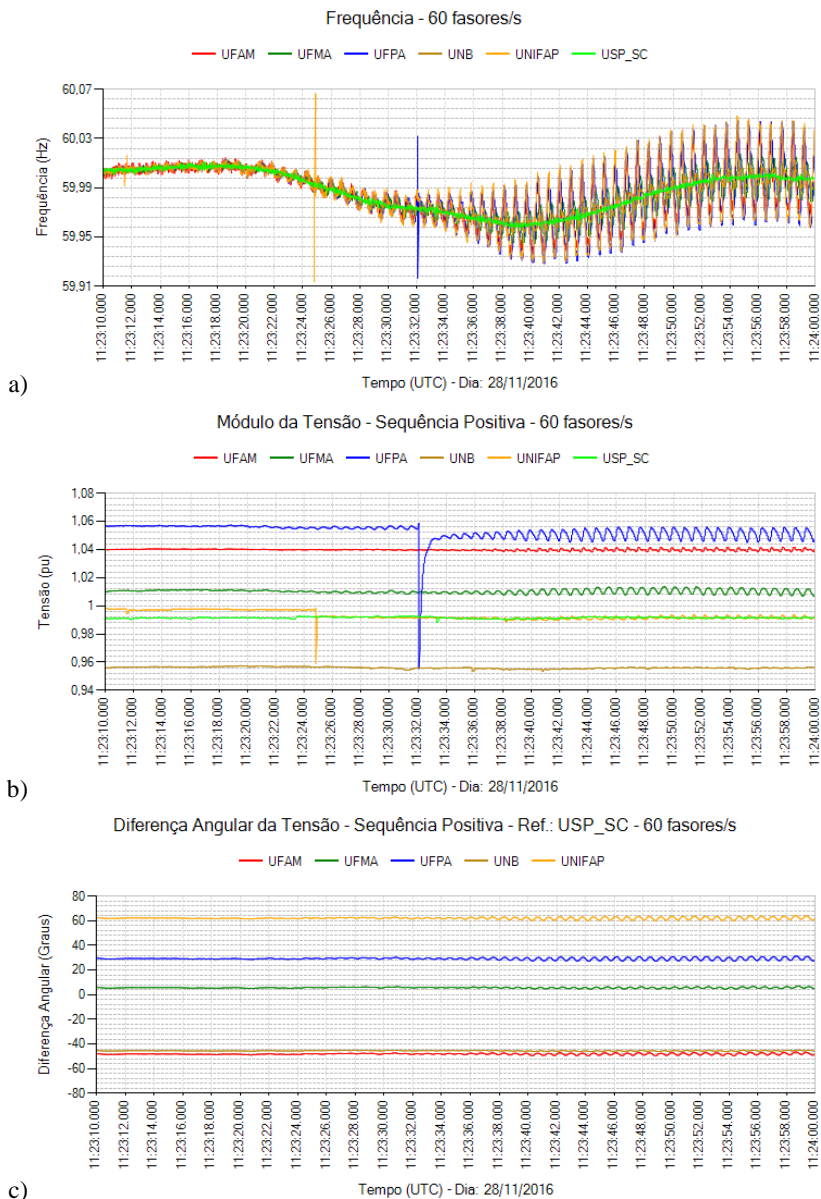


Figura 3.19 – (a) Frequência, (b) módulo da tensão e (c) diferença angular no início do Evento 10.



3.2.6. Síntese dos Tipos de Eventos

Eventos, cujos impactos são visíveis apenas nas grandezas elétricas medidas próximas ao local de sua ocorrência, são considerados eventos locais, enquanto que os eventos cujos impactos são observados em grandezas elétricas de diversas PMUs são considerados eventos sistêmicos. Dentre os eventos locais, destacam-se os curtos-circuitos, chaveamentos e mudanças topológicas que não interferem no balanço global de potência ativa do sistema. No presente trabalho, tais eventos são denominados **Salto**, pois se manifestam em grandezas elétricas como saltos no instante inicial.

Na Tabela 3.2 apresenta-se uma caracterização quanto às alterações das grandezas elétricas na ocorrência dos diferentes tipos de eventos, com base nos eventos registrados pelo SMSF MedFasee BT descritos anteriormente. Em amarelo, são destacados os sinais com as alterações mais acentuadas.

Tabela 3.2 – Características dos eventos.

Tipo de Evento	Alteração na frequência	Alteração no módulo da tensão	Alteração na diferença angular
Salto	Salto	Salto	Desprezível
Perda de Carga	Positiva (pode haver salto)	Positiva + oscilação (pode haver salto)	Oscilações
Perda de Geração	Negativa (pode haver salto)	Negativa + oscilação (pode haver salto)	Oscilações
Ilhamento	Positiva e Negativa (pode haver salto)	Oscilação (pode haver salto)	Positiva ou Negativa
Oscilações Sustentadas	Oscilações	Oscilações	Oscilações

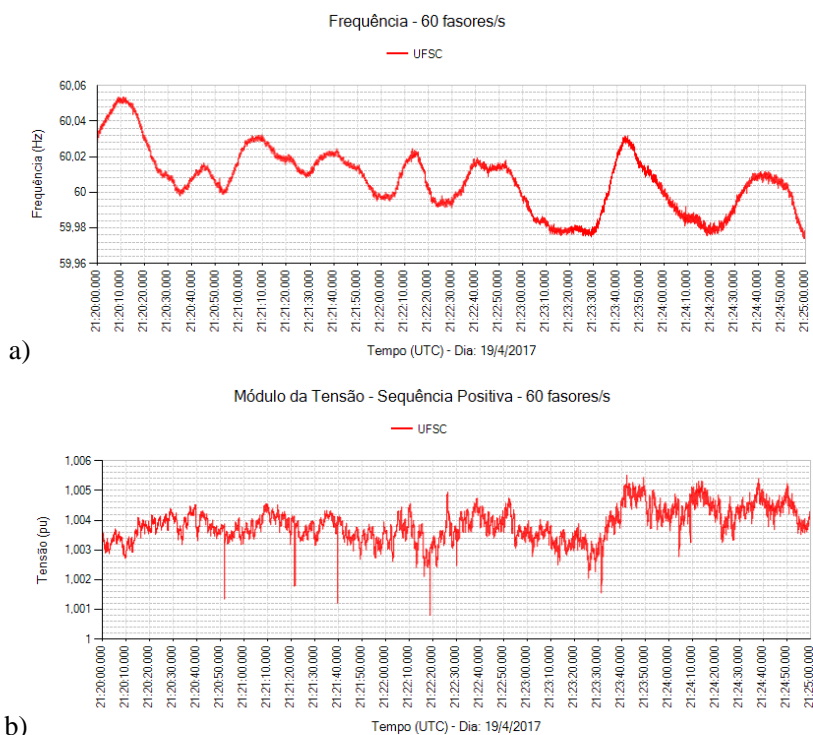
Verifica-se, pela Tabela 3.2, que o sinal mais indicado para se fazer a análise automática de eventos é a frequência, com exceção do ilhamento, caso em que a diferença angular possui um comportamento único. Outros fatores também contribuem para esta escolha, como as dificuldades da utilização da tensão e da diferença angular.

O módulo da tensão poderia ser utilizado como indicador de eventos de potência reativa, uma vez que injetar ou retirar reativo da

rede afeta diretamente o módulo da tensão das barras locais. No entanto, ao se realizar medições em baixa tensão, o módulo da tensão se torna sensível a fatores locais, como variações de carga e chaveamentos na rede de distribuição. Deste modo, o módulo da tensão medido em baixa tensão, não se mostra adequado para a análise de grandes áreas. Todavia, este tipo de problema é atenuado caso o SMSF tenha um grande número de pontos de medição (ZHANG, 2014).

Para exemplificar a sensibilidade da tensão às variações de cargas locais, apresentam-se na Figura 3.20 a frequência e o módulo da tensão ao longo de 5 minutos de operação, medidas em Florianópolis/SC (UFSC) no dia 19 de abril de 2017. A frequência apresenta apenas sua excursão natural enquanto que a tensão apresenta uma série de pequenos saltos. Tais saltos poderão causar interpretações equivocadas nas metodologias de análise de eventos e, portanto, o módulo da tensão não será utilizado no presente trabalho.

Figura 3.20 – (a) Frequência e (b) módulo da tensão em operação normal.



Para se trabalhar com a fase da tensão, a grande dificuldade se concentra na escolha de um referencial. Caso a PMU utilizada como referência perca comunicação, ficando indisponível, ou a PMU de referência esteja em uma situação de evento, podem ocorrer erros no processo de detecção. Para isso, deve ser elaborada uma estratégia capaz de escolher a referência adequada para cada instante.

Já a frequência calculada pelas PMUs apresenta características mais favoráveis aos propósitos da análise de eventos. Ao longo da operação em regime permanente, há uma excursão natural da frequência e, ainda, na ocorrência de eventos, a frequência se comporta conforme descrito na Tabela 3.2. Além disso, a TWD utilizada nas metodologias desenvolvidas neste trabalho possui grande capacidade de detectar descontinuidades abruptas, como as que ocorrem na frequência em situações de evento.

3.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados os principais tipos de eventos que ocorrem em SEEs, mostrando o comportamento das grandezas elétricas quando sujeitas a cada tipo de evento. Evidenciou-se que para a análise de eventos com medições na baixa tensão, a grandeza elétrica que melhor representa os diferentes tipos de evento é a frequência e, no caso de ilhamento, a diferença angular da tensão.

Definiram-se como eventos locais aqueles que afetam as grandezas elétricas em poucas áreas, sendo registrados apenas pelas PMUs próximas ao local do evento, geralmente por meio de saltos na frequência. Tais eventos são definidos no presente trabalho como saltos. Já os eventos sistêmicos são aqueles que se alastram por todo o sistema, afetando diversas regiões distantes geograficamente, sendo estes os eventos de maior interesse no presente trabalho. Este tipo de evento afeta o equilíbrio de potência ativa do sistema, podendo levá-lo a um ponto de operação inadequado.

4. DESENVOLVIMENTOS

Neste capítulo são apresentadas as metodologias para a análise automática de eventos em tempo real, desenvolvidas ao longo do presente trabalho. Tem-se por premissa explorar ao máximo o potencial da TWD como técnica de processamento de sinais em SEE. Para isso, inicialmente, é apresentada uma breve descrição da TWD e as características de seus coeficientes, quando as grandezas elétricas, provenientes de SMSF, estão submetidas aos eventos apresentados na seção anterior. Ressalta-se que no Apêndice A é apresentado uma abordagem mais completa referente às wavelets.

Em sequência, embasado nas características dos coeficientes wavelet, apresentam-se as metodologias desenvolvidas especificamente para cada uma das quatro etapas da análise de eventos, sendo elas: 1) detecção; 2) classificação; 3) localização da PMU mais próxima ao evento e; 4) estimativa da magnitude.

4.1. TRANSFORMADA WAVELET

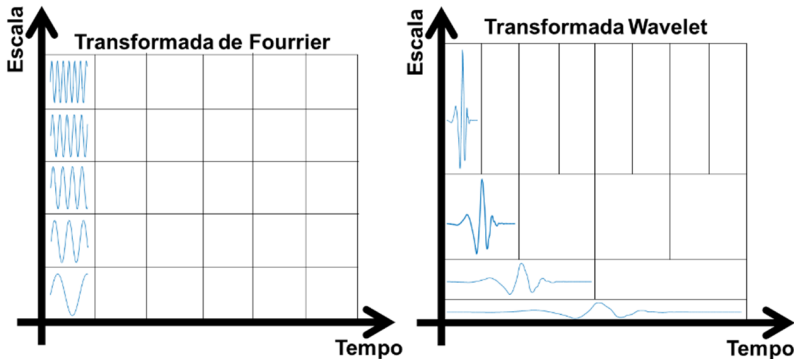
A Transformada Wavelet, cuja descrição matemática é apresentada no Apêndice A, é uma técnica de processamento de sinais, cujo sinal analisado é decomposto em diversas funções, assim como na Transformada de Fourier (TF). Na TF qualquer função periódica pode ser expressa (decomposta) em uma somatória de senos e cossenos com diferentes frequências. Já na TW, a função pode ser expressa (decomposta) por um conjunto de funções finitas, com forma de pequenas ondas, oriundas de uma função wavelet mãe, a qual, por meio de translações e dilatações, dá origem às wavelets filhas, cada uma correspondente a uma banda de frequências diferente.

Tais translações e dilatações fazem com que os cálculos da TW tenham janelas de tamanhos variáveis, permitindo que as informações de frequência do sinal amostrado sejam extraídas em conjunto com a informação temporal de cada frequência. A TF faz uso de janelas de tamanhos fixos, deste modo as informações de frequência do sinal são calculadas para todo o período amostrado. Assim, caso haja um evento transitório no sinal, este transitório contribuirá para todo o cálculo da TF e a informação temporal deste transitório não será extraída. A diferença entre o tamanho das janelas é ilustrado na Figura 4.1.

Neste sentido, pode-se afirmar que a TF é indicada para a análise de sinais estacionários, onde se quer representar as diferentes frequências que compõem o sinal, transformando o sinal no domínio do

tempo para o domínio da frequência. A TW é indicada para se analisar as diferentes características não estacionárias de um sinal, transformando o sinal no domínio do tempo para o domínio do tempo-frequência.

Figura 4.1 – Comparação entre o tamanho das janelas da TF e da TW.



A Transformada Wavelet Discreta (descrita em detalhes no Apêndice A, seção A.4.2), proposta em Mallat (1989), consiste em decompor um sinal a diferentes níveis de resolução, processo conhecido como *Análise Multiresolução*. A cada nível de resolução o sinal é decomposto em coeficientes de “detalhe” e “de aproximação”. Nos coeficientes de detalhe, são extraídas informações contendo a metade superior da banda de frequência do sinal, enquanto nos coeficientes de aproximação são extraídas informações contendo a metade inferior. Os coeficientes de detalhe e de aproximação podem, então, passar por uma nova decomposição, gerando novos coeficientes de detalhe e de aproximação. Tal processo pode ser repetido até o nível desejado ou possível.

A cada nível de decomposição a amplitude do sinal é reduzida pela metade, processo denominado *dizimação* por 2. Assim, um sinal contendo N amostras poderá ser, somente, submetido a J níveis de decomposição, conforme Equação 4.1. Se esta relação não for considerada, surgirá nos coeficientes o denominado “efeito de borda”, semelhante ao vazamento espectral que ocorre na TF.

$$N = 2^J \quad (4.1)$$

As separações das bandas de frequência permitem que, nos primeiros níveis de resolução, as variações mais abruptas do sinal sejam extraídas pelos coeficientes de detalhe, enquanto que uma versão mais suave do sinal original, sem as componentes de alta frequência, é extraída pelos coeficientes de aproximação.

Deste modo, a análise multiresolução da TWD é apropriada para a detecção e a localização de transitórios com componentes de baixa e alta frequência, situação comum em sinais com faltas e distúrbios em SEE (COSTA et al., 2010).

As metodologias desenvolvidas no presente trabalho se utilizam da energia dos coeficientes de detalhe da TWD, aplicadas ao sinal da frequência. A energia de um sinal é definida como a integral ou, no caso discreto, a soma da sua potência instantânea, conforme a Equação 4.2.

$$E_{\infty} = \int_{-\infty}^{+\infty} |s(t)|^2 dt = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} |s(n)|^2 \quad (4.2)$$

Considerando o *Teorema de Parseval* para as wavelets, tem-se que a energia contida em uma função no domínio do tempo é igual à somatória da energia concentrada nos coeficientes da TWD restantes em todos os diferentes níveis de decomposição utilizados (BURRUS, 1997). Matematicamente, isto pode ser expresso conforme a Equação 4.3.

$$\sum_{n=1}^N |s(n)|^2 = \sum_{n=1}^{N_J} |cA_J(n)|^2 + \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^{N_j} |cD_j(n)|^2 \quad (4.3)$$

onde:

$s(n)$: sinal no domínio do tempo;

N : quantidade de amostras no sinal;

N_j : quantidade de amostras no nível j ;

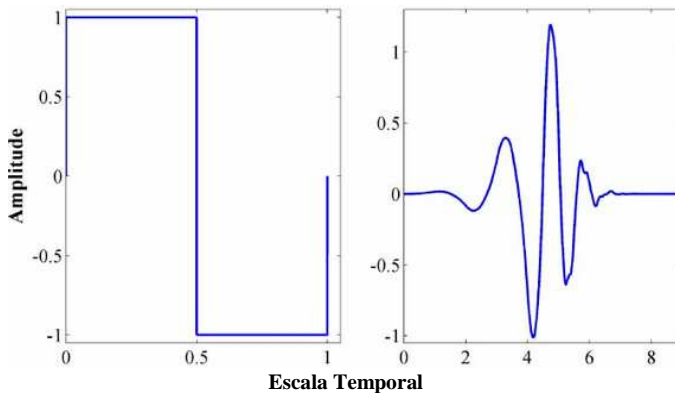
$\sum_{n=1}^N |s(n)|^2$: energia concentrada no sinal;

$\sum_{n=1}^N |cA_J(n)|^2$: energia concentrada nos coeficientes de aproximação do nível J e;

$\sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N |cD_j(n)|^2$: energia concentrada nos coeficientes de detalhe dos níveis 1 ao J .

Existe uma grande variedade de funções wavelets-mãe, no entanto não há na literatura um manual para a escolha da wavelet mais adequada para cada aplicação. Recomenda-se, então, a utilização de uma wavelet cujo formato reflita as características do sinal analisado (BARBOSA et al., 2008). As wavelets mais suaves são adequadas para análises com uma melhor resolução no domínio da frequência, enquanto as mais abruptas são indicadas para análises onde se deseja uma melhor resolução no domínio do tempo (KIM et al., 2000). Para se analisar sinais com variações abruptas, recomenda-se a utilização das wavelets *Daubechies* ou *Haar*, representadas na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Wavelet Haar (esquerda) e Daubechies 4 (direita).



Das análises realizadas, observou-se que utilizando a wavelet com menor resolução no domínio do tempo, a *Haar*, o instante inicial da ocorrência de um evento é detectado com maior precisão. Deste modo, no presente trabalho, optou-se por utilizar a wavelet *Haar*, cuja formulação matemática é apresentada brevemente a seguir.

4.1.1. Wavelet Haar

Os cálculos dos coeficientes de aproximação (cA) e detalhe (cD), utilizando a wavelet-mãe *Haar*, são realizados por intermédio das equações 4.4 e 4.5, considerando um vetor finito S de comprimento N , conforme a Equação 4.1. Tais coeficientes são calculados em termos do sinal analisado, deste modo, sua unidade é a mesma do sinal.

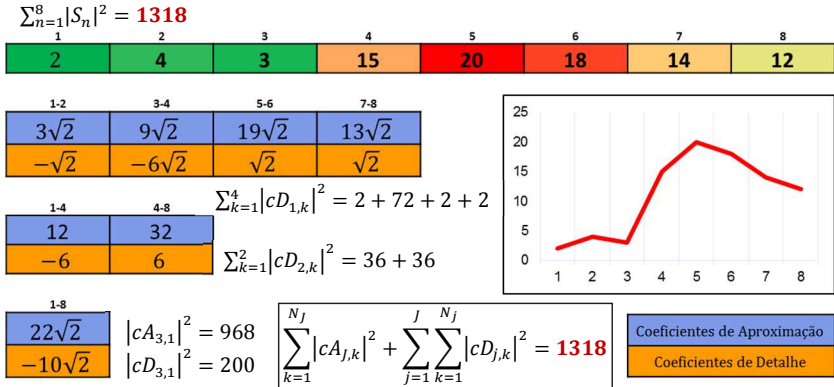
$$cA_{1+n} = \sqrt{2} \left(\frac{S_{1+2n} + S_{2+2n}}{2} \right) = \left(\frac{S_{1+2n} + S_{2+2n}}{\sqrt{2}} \right) \quad (4.4)$$

$$cD_{1+n} = \sqrt{2} \left(\frac{S_{1+2n} - S_{2+2n}}{2} \right) = \left(\frac{S_{1+2n} - S_{2+2n}}{\sqrt{2}} \right) \quad (4.5)$$

sendo $n = 0, 1, \dots, N/2 - 1$.

Este processo se assemelha a cálculos de “médias” e “diferenças” entre cada par de amostras do vetor (sinal), onde nas médias tem-se as aproximações e nas diferenças os detalhes. Na Figura 4.3 apresenta-se um exemplo do cálculo da TWD *Haar*, para um vetor com oito amostras. O sinal foi submetido a três níveis de decomposição, restando apenas uma amostra nos coeficientes de detalhe e aproximação no último nível de decomposição.

Figura 4.3 – Exemplo da TWD utilizando a wavelet Haar.



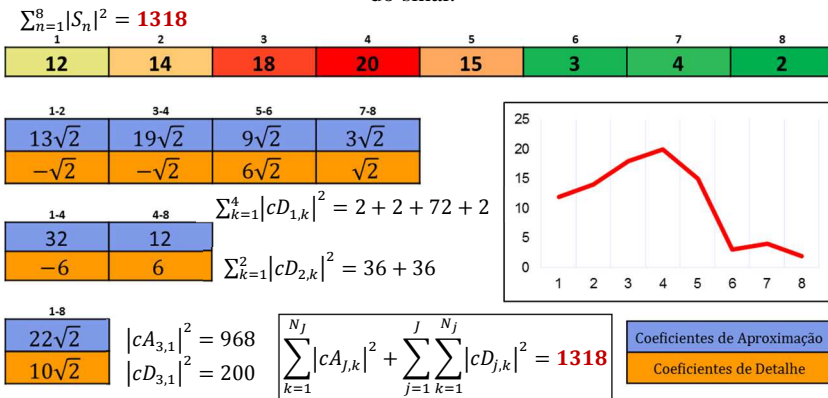
No primeiro nível de decomposição são analisados cada “par” de amostras. No segundo nível se analisa cada “par” dos coeficientes de aproximação do nível anterior. Pode-se fazer uma analogia com a comparação entre a primeira e a segunda amostra do sinal com a terceira e a quarta amostra, e no terceiro nível, entre a primeira metade do sinal com a metade final. Assim, pode-se dizer que cada nível de decomposição utiliza uma janela de tamanho 2^j , sendo j o respectivo nível.

Os primeiros níveis de detalhe extraem as variações abruptas do sinal e os últimos níveis, extraem as informações referentes à dinâmica do sinal. No exemplo da Figura 4.3, se utilizado um limiar para detecção

de uma mudança abrupta igual 4, seria encontrado, no primeiro nível de decomposição, um evento na segunda amostra $(-6\sqrt{2})$. Já nos demais níveis, o alto valor nos coeficientes de detalhe indicam que houve mudanças na dinâmica do sinal. Caso, após a variação abrupta (entre a terceira e quarta amostra), o sinal voltasse a operar com valores entre 2 e 4, os coeficientes de detalhe dos últimos níveis teriam valores pequenos.

Além disso, a orientação dos coeficientes de detalhe no último nível de decomposição indica a característica da dinâmica do sinal, uma vez que neste nível é comparado a primeira metade com a segunda metade do sinal original. Por fins de ilustração, na Figura 4.4 é apresentado o cálculo da TWD utilizando a wavelet *Haar* para uma versão espelhada do sinal.

Figura 4.4 – Exemplo da TWD utilizando a wavelet *Haar* na versão espelhada do sinal.



De modo análogo ao caso anterior, a variação abrupta pode ser facilmente detectada no primeiro nível de decomposição. Quanto a dinâmica, no caso da Figura 4.3, o sinal apresentou uma elevação refletida em valor negativo no coeficiente de detalhe do último nível de decomposição $(-10\sqrt{2})$, e no caso da Figura 4.4, a dinâmica do sinal apresentou um decaimento que foi refletido em valor positivo no coeficiente de detalhe do último nível de decomposição $(10\sqrt{2})$.

Esta é a principal ideia na análise de sinais pela TWD. Cada nível de decomposição representa a uma escala da wavelet mãe. Nos primeiros níveis, são extraídas as informações de alta frequência do sinal, ou seja, as variações mais abruptas, como a ocorrência de eventos em SEE. Já nos níveis mais elevados, porções maiores do sinal são

analisadas, deste modo, pode-se dizer que as componentes de frequência analisadas correspondem às características da dinâmica do sinal. Tais características são fundamentais para o processo de análise de eventos.

Outra característica interessante da TWD é a capacidade de reconstruir o sinal, conforme as Equações 4.6 e 4.7. Assim, a TWD permite que o sinal original seja filtrado das componentes de alta frequência, zerando-se ou colocando limites nos coeficientes de detalhe.

$$S_{1+2n} = \frac{(cA_{1+n} + cD_{1+n})}{\sqrt{2}} \quad (4.6)$$

$$S_{2+2n} = \frac{(cA_{1+n} - cD_{1+n})}{\sqrt{2}} \quad (4.7)$$

Uma última análise realizada nas Figuras 4.3 e 4.4 se refere a energia do sinal e dos coeficientes da TWD. Conforme a Equação 4.3, a energia do sinal deve ser igual a somatória da energia contida nos coeficientes de aproximação do último nível de decomposição mais a energia contida em todos os coeficientes de detalhe. Tais energias estão apresentadas nas figuras e sua somatória satisfaz a Equação 4.3 (*Teorema de Parseval* aplicado às wavelets).

4.1.2. Transformada Wavelet Discreta em Eventos de SEE

Conforme mencionado na Seção 3.1, os SEEs estão sujeitos a distúrbios transitórios de diferentes durações, contendo componentes de frequência diversas, refletidas nas grandezas elétricas. Para se analisar estes transitórios seria ideal uma técnica de processamento de sinais para analisar as grandezas elétricas em múltiplas escalas, na qual a largura da janela de tempo e a banda de frequência não sejam constantes. Assim, janelas longas analisariam os fenômenos de baixas frequências, e janelas mais curtas, os fenômenos de alta frequência, possibilitando uma flexibilidade maior para a análise (COSTA et al., 2010).

Conforme apresentado na Seção 4.1.1, a TWD é capaz de realizar este tipo de análise de acordo com o nível de decomposição. A seguir, são apresentados os resultados da TWD, utilizando a wavelet *Haar* como wavelet mãe e oito níveis de decomposição, no sinal da frequência, aplicados em três eventos registrados pelo SMSF MedFasee BT. Optou-se por analisar o sinal de diversos pontos de medição, distantes geograficamente, a fim de demonstrar as características dos

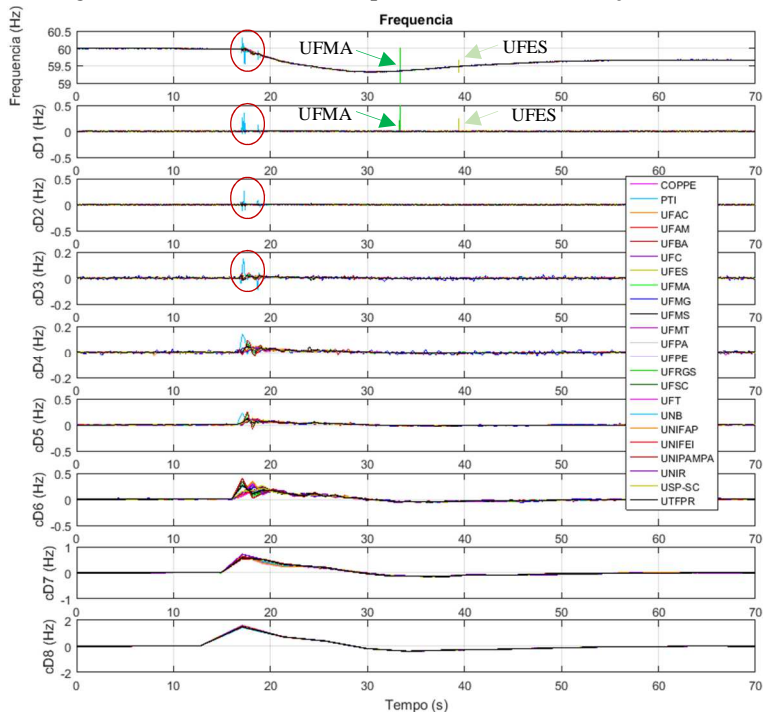
coeficientes de detalhe, ao longo dos eventos, relativamente a toda a extensão do SIN. Os eventos analisados são do tipo perda de geração, perda de carga e salto, cujas características podem ser utilizadas na análise dos demais eventos (ilhamento e oscilações sustentadas).

As figuras apresentadas nesta seção estão representadas em função do tempo. A cada nível de decomposição o tamanho do sinal se reduz ao meio, assim, cada amostra corresponde ao dobro de amostras do nível anterior. Desta forma, a cada nível perde-se a precisão temporal, mas mantém-se informações da dinâmica.

• Perda de Geração

Na Figura 4.5 é apresentada uma decomposição no sinal da frequência para um evento do tipo perda de geração.

Figura 4.5 – TWD em 8 níveis para uma Perda de Geração.



Observa-se que os saltos no instante inicial do evento (destacado em vermelho) são extraídos com facilidade nos três primeiros níveis de

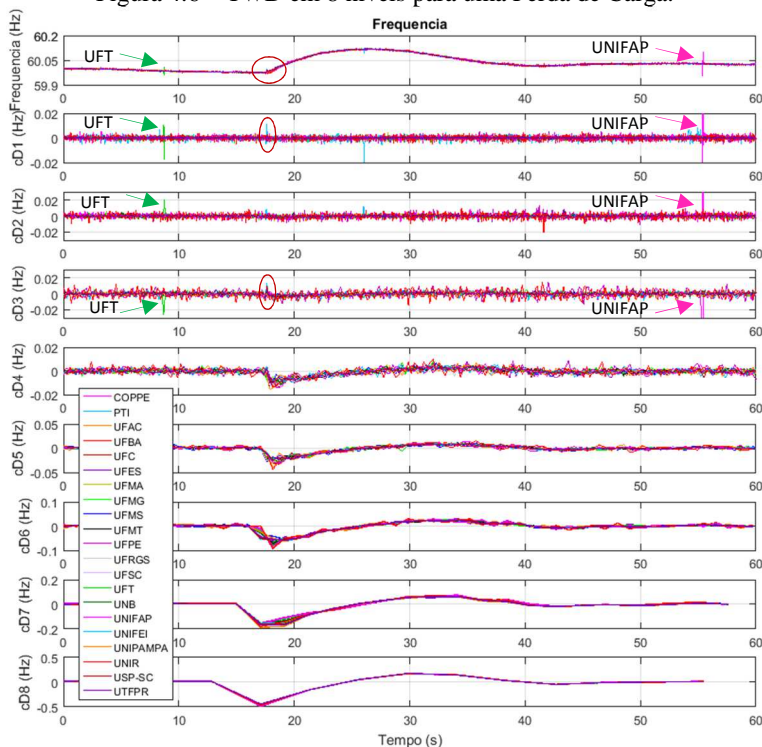
decomposição, bem como os saltos isolados registrados nos sinais da UFMA, no segundo 34, e da UFES, no segundo 39.

A partir do quarto nível de decomposição é possível verificar a ocorrência do evento no sinal de frequência para todas as PMUs. A partir do quinto nível de decomposição, a orientação dos coeficientes de detalhe passa a ser nítida. Após a ocorrência do evento, as frequências medidas por todas as PMUs apresentam um declínio, sendo este refletido em valores positivos nos coeficientes de detalhe.

• Perda de Carga

Na Figura 4.6 é apresentada uma decomposição no sinal da frequência para um evento do tipo perda de carga.

Figura 4.6 – TWD em 8 níveis para uma Perda de Carga.



Observa-se que, apesar de não apresentar grandes saltos no instante inicial (destacado em vermelho), a ocorrência do evento pode ser detectada por alguns sinais no primeiro e terceiro níveis da

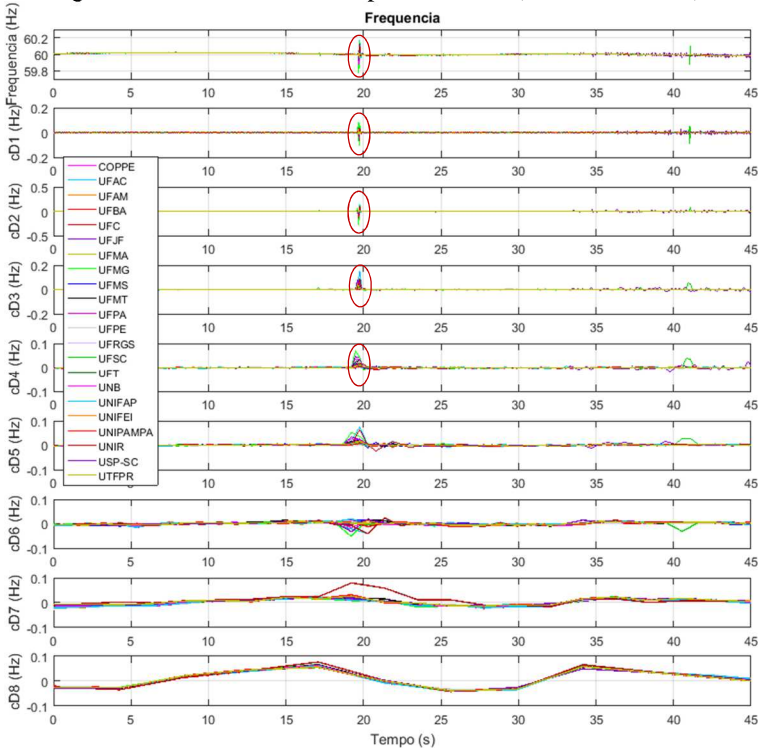
decomposição. Já no quarto nível, a ocorrência do evento pode ser verificada em todos os sinais. Saltos isolados registrados nos sinais da UFT, no segundo 09 e da UNIFAP, no segundo 55, são extraídos com facilidade nos três primeiros níveis de decomposição.

Assim como no caso anterior, a orientação dos coeficientes de detalhe passa a ser nítida a partir do quarto nível de decomposição. Após a ocorrência do evento, as frequências medidas por todas as PMUs apresentam uma elevação, que se reflete por meio de valores negativos nos coeficientes de detalhe.

• Salto – Abertura de linha

Na Figura 4.7 é apresentada uma decomposição no sinal da frequência para um evento do tipo salto, provocado pela abertura de uma linha de transmissão.

Figura 4.7 – TWD em 8 níveis para um Salto (abertura de linha).



O instante da ocorrência do evento é destacado em vermelho. Assim como nos casos anteriores, observa-se que o evento pode ser facilmente detectado nos primeiros quatro níveis da decomposição. No entanto, não é nítida uma orientação (positiva ou negativa) no valor dos coeficientes de detalhe dos níveis 5 ao 8.

4.1.3. Síntese das características da TWD na Análise de Eventos

Nesta seção apresenta-se uma lista de considerações em relação às características dos coeficientes de detalhe da TWD para eventos no SIN. Tais considerações foram realizadas após a análise do comportamento dos coeficientes de detalhe em diversos eventos registrados pelo SMSF MedFasee BT, dos quais três deles foram selecionados e ilustrados na seção anterior.

- **Salto**: pode ser facilmente detectado nos quatro primeiros níveis de decomposição do respectivo sinal;
- **Perda de geração**: pode ser detectada nos quatro primeiros níveis de decomposição. A partir do quinto nível de decomposição, os coeficientes de detalhe possuem valores positivos para os sinais medidos em todas as regiões do SIN;
- **Perda de carga**: pode ser detectada nos quatro primeiros níveis de decomposição. A partir do quinto nível de decomposição, os coeficientes de detalhe possuem valores negativos para os sinais medidos em todas as regiões do SIN;
- **Oscilações entre áreas do sistema**: a partir do quinto nível de decomposição, sinais de uma das áreas podem apresentar coeficientes de detalhe positivos e de outra área negativos;
- **Ilhamento**: apresentam características semelhantes à oscilação entre áreas;

4.2. DETECÇÃO DE EVENTOS

As metodologias desenvolvidas no presente trabalho são destinadas à aplicação em análise de eventos em tempo real. Desta forma, é necessário um constante acompanhamento dos coeficientes de

detalhe da TWD. Conforme apresentado no exemplo da Seção 4.1.1, a ocorrência de mudanças abruptas em um sinal com tamanho fixo pode ser facilmente detectada nos coeficientes de detalhe. No entanto, a presença de ruídos no sinal poderia causar falsas detecções de eventos.

Para assegurar uma maior confiabilidade ao método proposto, a detecção de eventos é realizada pela observação da energia contida nos coeficientes de detalhe ao longo de uma janela deslizante. Caso a energia exceda um determinado *threshold* (denominado *Thr_Det*), um evento é detectado. O tamanho da janela deslizante tem impacto direto na *performance* do detector, uma vez que quanto maior for o tamanho da janela, menor será o impacto de um evento na energia contida nos coeficientes de detalhe desta janela. Assim, eventos de pequeno porte poderão passar despercebidos caso a janela utilizada seja muito grande e, caso a janela seja muito pequena, falsos eventos podem ser detectados na presença de ruídos. Segundo a Equação 4.1, o tamanho da janela deve conter 2^J amostras, sendo J o nível de decomposição.

A janela deslizante s_{jan} utiliza amostras passadas que podem ser utilizadas para o monitoramento em tempo real e, também, amostras no instante atual. Pode-se dizer que a janela se atualiza na mesma taxa que a taxa de amostragem do sistema de medição, no caso do SMSF MedFasee BT a taxa de amostragem é de 60 fasores por segundo. A janela é estruturada conforme a Equação 4.8 e ilustrada na Figura 4.8, onde $s_{jan}[n]$ representa a amostra que está sendo analisada:

$$s_{jan}[n] = s[p - N + n], \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (4.8)$$

onde:

N : número de amostras da janela deslizante;

n : amostra que está sendo analisada;

$p = 1, 2, 3, \dots, \infty$: amostra atual do sinal em tempo real.

Figura 4.8 – Representação de uma janela deslizante (M=8).



A TWD é realizada a cada nova amostra e, então, a energia, denominada de Energia Wavelet Modificada (EWM), é a função que calcula os valores RMS dos coeficientes de detalhe da TWD da janela deslizante, conforme a Equação 4.9 (KIM et al., 2015). O valor RMS é utilizado para diminuir os efeitos causados pela diferença no tamanho da janela.

$$EWM(n, N, J) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{N_j} |cD_{j,k}[n]|^2} \quad [Hz] \quad (4.9)$$

onde N_j é o número de amostras em cada nível de detalhe j .

A função $EWM(n, N, J)$ deve ser normalizada para que as diferentes características causadas pelo local de medição (ruídos da rede) e pelo instante temporal (horário, estação do ano, datas especiais, entre outros) que o sinal está sendo medido sejam removidas. Observa-se no sinal da frequência, ao longo de uma condição normal de operação, que uma pequena fração de hora (minutos) apresenta características tanto estacionárias quanto de tendência do sinal, conforme pode-se observar na Figura 3.2. Assim, pode-se utilizar uma janela contendo amostras passadas para normalizar a EWM (KIM et al., 2015). Na Equação 4.10 é apresentada a equação da Energia Wavelet Normalizada (EWN).

$$EWN(n, N, J) = \frac{EWM(n, N, J)}{EWM(n, M, J)} \quad [p. u.] \quad (4.10)$$

onde M é o número de amostras utilizadas na janela de normalização, definido no presente trabalho como 1 minuto, ou seja, 3600 amostras.

Outra vantagem ao se normalizar a energia é a facilidade para se definir o *threshold* de detecção (Thr_Det), pois quando o sistema está em operação normal, a EWN se concentra em valores próximos da unidade, já quando há a ocorrência de eventos, esta energia cresce se afastando significativamente deste valor. No caso da EWM, cada ponto de medição precisaria ter seu próprio Thr_Det , pois as características de cada sinal (como por exemplo o nível de ruído) resulta em valores normais de operação diferentes.

Para se fazer a detecção de eventos, a EWN de cada sinal analisado será comparada com o *Thr_Det*. Eventos sensibilizando apenas um ponto de medição ocorrem inúmeras vezes durante um dia, gerando uma quantidade enorme de detecções que, a nível de operação do sistema interligado, são consideradas irrelevantes. Deste modo, será somente confirmado um evento caso a EWN de duas ou mais PMUs, relativamente distantes geograficamente, extrapolem o *Thr_Det* em um intervalo curto de tempo (*Tem_Det*, tempo para detecção). Após confirmado um evento, todas as PMUs cuja EWN ultrapassar o *Thr_Det* em um intervalo de tempo (*Tem_Eve*, duração do evento) após a primeira detecção, são agrupados em um único evento. Assim, finaliza-se a etapa de detecção e segue-se para a etapa de classificação do evento. O algoritmo continua em operação de forma ininterrupta enquanto as próximas etapas da análise de eventos são executadas.

Para os dados do SIN obtidos pelo SMSF MedFasee BT, as variáveis *Tem_Det* e *Tem_Eve* foram parametrizadas em 300 milissegundos e 1 segundo respectivamente. Outros SMSF podem necessitar de configurações diferentes.

Um pseudo algoritmo desenvolvido para a detecção de eventos é apresentado no Apêndice B.1. Na Figura 4.9 é apresentado um fluxograma relativo à implementação computacional deste algoritmo. Os principais passos envolvidos no processo de detecção de eventos se resumem em:

- 1) Ao longo da janela deslizante, para todas as PMUs, calcular:

$$EWM(n, N, J) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{N_j} |cD_{j,k}[n]|^2} \text{ e } EWN(n, N, J) = \frac{EWM(n, N, J)}{EWM(n, M, J)}$$

- 2) Comparar a EWN com o *Thr_Det*;
- 3) Se dentro de um intervalo de 300 milissegundos, a EWN de duas ou mais PMUs extrapolar o *Thr_Det* um evento é confirmado;
- 4) Agrupar demais PMUs que extrapolem o *Thr_Det* em até 1 segundo após a primeira detecção;
- 5) O evento confirmado segue para a etapa de classificação;

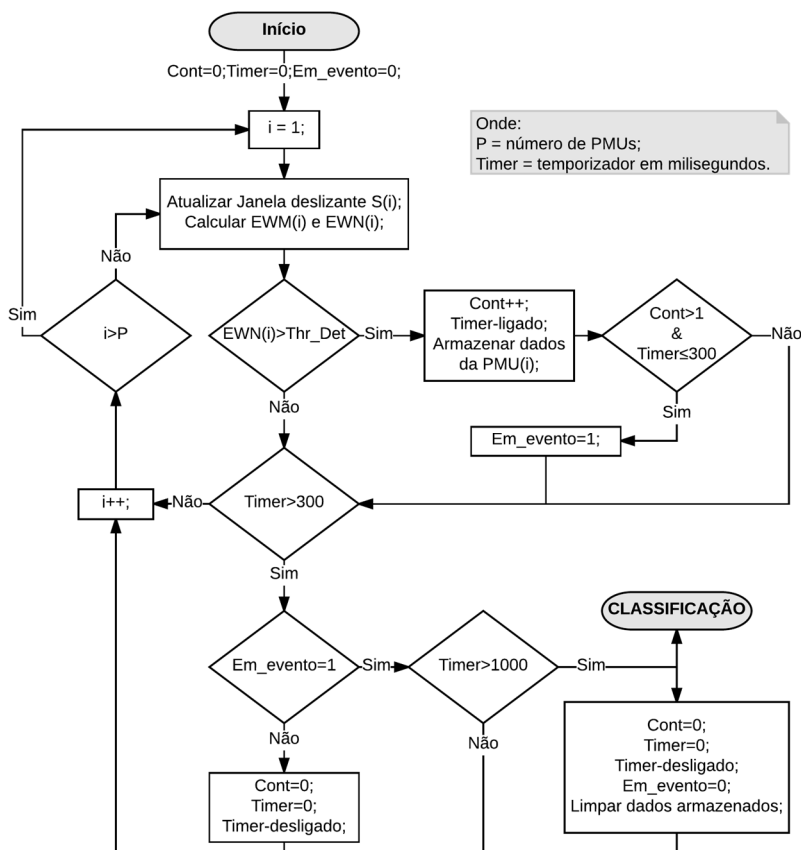
Para o sinal de frequência de cada PMU, o algoritmo atualiza a janela deslizante e faz o cálculo das energias EWM e EWN (Equações 4.9 e 4.10). Compara-se a EWN com o *Thr_Det*, caso a EWN extrapolar

o Thr_Det , o sinal foi sensibilizado por um evento. Assim, o contador ($Cont$) é incrementado e o temporizador ($Timer$) é acionado.

Ao confirmar um evento, a variável Em_evento recebe o valor 1. Após confirmado um evento, todas as PMUs cuja EWN extrapolar o Thr_Det em até de 1 segundo após a primeira extrapolação, são agrupadas em um mesmo evento.

A etapa de classificação e as demais etapas são realizadas de forma paralela ao detector de eventos. Assim, após a detecção de um evento, enquanto as próximas etapas do processo de análise automática de eventos estão sendo processadas, o detector de eventos continua a monitorar o sinal da frequência em tempo real. Ou seja, o detector opera de forma ininterrupta.

Figura 4.9 – Fluxograma do Detector de Eventos.



4.3. CLASSIFICAÇÃO DE EVENTOS

O processo de classificação de eventos foi dividido em duas etapas. A primeira etapa é responsável por analisar de forma individual o sinal medido por cada ponto de medição do sistema, classificando o tipo de evento registrado em cada ponto. Na segunda etapa, uma estratégia de agregação deve analisar o tipo de evento registrado por cada ponto de medição e, então, fazer o diagnóstico final do tipo de evento ocorrido no SEE.

A primeira etapa pode ser aplicada ao sinal de todas as PMUs, no entanto, a segunda etapa deve levar em consideração as características do SMSF em que a metodologia é aplicada. No presente trabalho, utiliza-se o SMSF MedFasee BT, no qual as PMUs estão naturalmente distantes geograficamente, classificando assim, o evento registrado na região de cada PMU. Ao se trabalhar com SMSF que possuem grandes quantidades de PMUs instaladas em uma mesma subestação, ou em subestações muito próximas geograficamente, estratégias diferenciadas devem ser aplicadas para o diagnóstico final.

Um exemplo seria a inserção de uma nova etapa para diagnosticar o tipo de evento em cada região (norte, sul, etc) ou estado (SC, AM, etc) e então, fazer o diagnóstico final. Outra ideia, seria adotar estratégias para selecionar quais as PMUs a serem utilizadas na etapa de classificação.

As duas etapas do processo de classificação estão descritas na sequência, respectivamente nas Subseções 4.3.1 e 4.3.2.

4.3.1. Primeira Etapa: Classificação Individual por Região

A primeira etapa da classificação se baseia na análise da energia dos coeficientes de detalhe dos níveis mais elevados da TWD. Os eventos a serem classificados no presente trabalho são do tipo perda de carga, perda de geração, ilhamento e salto (de acordo com a metodologia desenvolvida, evento do tipo Oscilações Sustentadas serão classificados como salto).

Para classificar eventos sistêmicos, é necessário observar a dinâmica do sinal da frequência. Deste modo é necessário que dados pré e pós o instante da ocorrência do evento sejam analisados. Markham (2012), por meio de uma rede neural, classificou eventos do tipo perda carga, perda de geração e desligamento de linhas de transmissão utilizando 2 segundos de dados pós evento.

De acordo com a Equação 4.1, o tamanho da janela do sinal analisado deve conter 2^J amostras, sendo J o nível de decomposição. Como o algoritmo desenvolvido no presente trabalho tem por premissa a operação em tempo real, é desejável a utilização da menor janela possível. É utilizado sete níveis de decomposição, totalizando em $2^7 = 128$ amostras, o que equivale a 2,13 segundos de dados. Destes, 20 são amostras passadas e 108 amostras após o instante inicial do evento, o que equivale a 1,8 segundos de dados pós evento.

A energia contida em cada nível de decomposição é a somatória da energia de cada coeficiente. No entanto, devido às características apresentadas nas subseções 4.1.2 e 4.1.3, a orientação da energia dos coeficientes de detalhe dos níveis mais elevados da TWD é importante para o processo de classificação. Já para os níveis mais baixos da decomposição, a energia indica a presença de saltos ou ruídos no sinal, não sendo importante para o processo de classificação. No entanto, essa informação é utilizada posteriormente para se estimar a taxa de variação da frequência equivalente do sistema e, também, na relação com a proximidade do local da ocorrência do evento com a PMU.

Deste modo, o cálculo da energia contida nos níveis mais baixos (1 ao 4) e mais elevados (5 ao 7) são realizados conforme as Equações 4.11 e 4.12, mantendo-se assim a orientação dos níveis mais elevados.

$$E_j = \sum_{k=1}^{N_j} |cD_{j,k}[n]| \cdot |cD_{j,k}[n]| \quad [Hz^2], \text{ para } j = 1, 2, 3 \text{ e } 4 \quad (4.11)$$

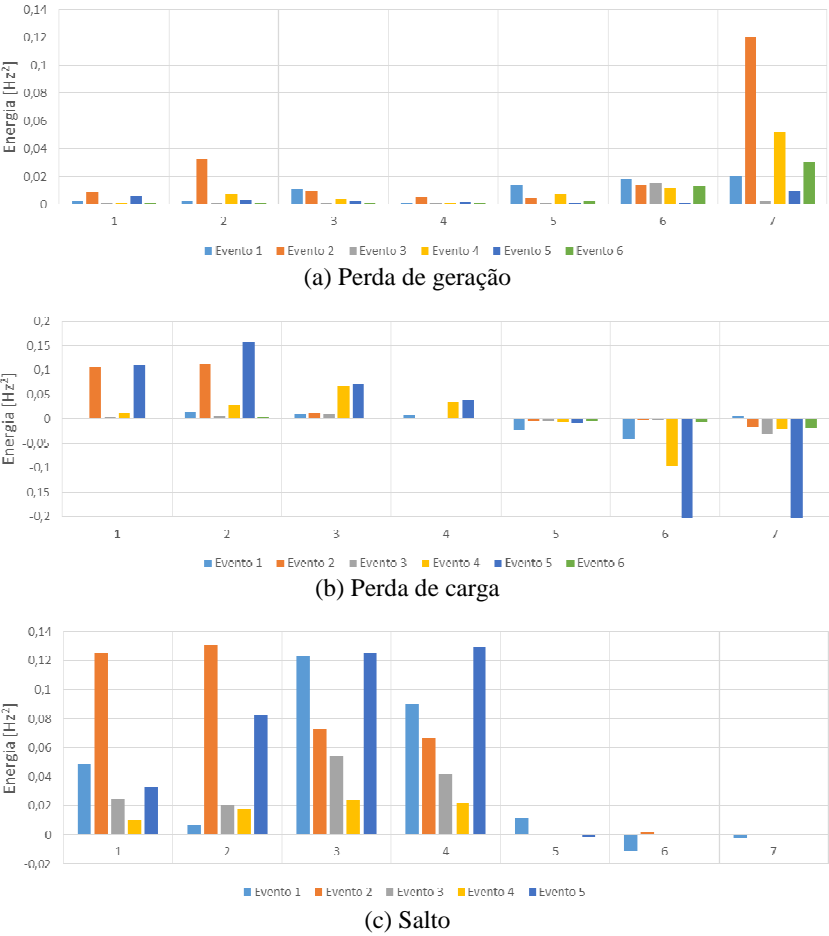
$$E_j = \sum_{k=1}^{N_j} |cD_{j,k}[n]| \cdot cD_{j,k}[n] \quad [Hz^2], \text{ para } j = 5, 6 \text{ e } 7 \quad (4.12)$$

onde N_j é o número de coeficientes no nível de decomposição j .

Na Figura 4.10 apresenta-se o espectro wavelet, em sete níveis de decomposição do sinal da frequência, registrado por uma PMU, para (a) seis eventos do tipo perda de geração, (b) seis eventos do tipo perda de carga e (c) cinco eventos do tipo salto, todos registrados pelo SMSF MedFasee BT. As energias foram calculadas conforme as Equações 4.11 e 4.12. Uma breve descrição dos eventos e do ponto de medição (PMU) utilizados para construir a Figuras 4.10 é apresentada no Apêndice C.

Ao se analisar a Figura 4.10, observa-se que para os eventos do tipo perda de geração, as energias dos níveis 5 ao 7 apresentam valores positivos, enquanto que para eventos do tipo perda de carga, os valores destes coeficientes são negativos. Já os eventos do tipo salto não apresentam valores significativos nas energias dos níveis 5 ao 7.

Figura 4.10 – Espectro wavelet para eventos do tipo (a) perda de geração, (b) perda de carga e (c) salto. O eixo horizontal corresponde ao nível da decomposição.



Na Figura 4.11, apresenta-se o espectro wavelet dos níveis 5 ao 7 para um evento do tipo salto seguido de oscilação (descrito no Apêndice C), cuja frequência é apresentada na Figura 3.5. Observa-se que as energias não possuem uma orientação definida como nos casos da Figura 4.10 (a) e (b). Assim, a somatória das energias dos níveis 5 ao 7 pode apresentar valor muito pequeno e, ainda, parte dos pontos de medição podem apresentar energia positiva e parte energia negativa, conforme a Figura 4.11.

Há uma peculiaridade no valor das energias do espectro wavelet para eventos do tipo ilhamento. Como a frequência do sistema isolado se afasta da frequência do restante do sistema, as energias dos níveis 5 ao 7 crescem significativamente. Na Figura 4.12 ilustra-se o espectro wavelet para 5 eventos do tipo ilhamento, descritos no Apêndice C.

Figura 4.11 – Espectro wavelet dos níveis 5 ao 7 para o evento da Figura 3.5. O eixo horizontal corresponde ao nível da decomposição.

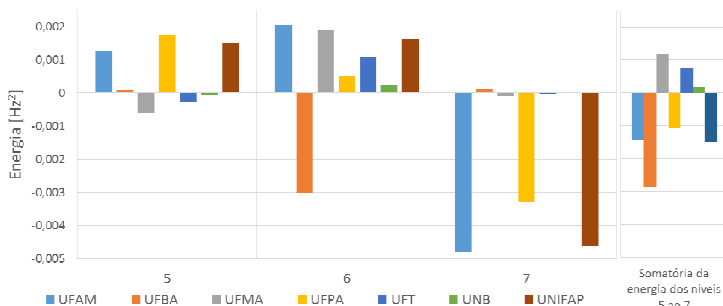
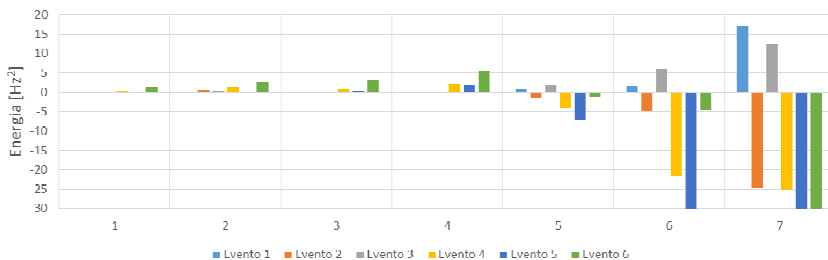


Figura 4.12 – Espectro wavelet para eventos do tipo ilhamento. O eixo horizontal corresponde ao nível da decomposição.



Observando-se as Figuras 4.10 a 4.12 é possível destacar algumas constatações, referentes às características das energias dos coeficientes de detalhe da TWD, relativas aos níveis 5 a 7, em eventos registrados pelo SMSF MedFasee BT no SIN.

- **Perda de geração**: energia positiva em todos os pontos de medição;
- **Perda de carga**: energia negativa em todos os pontos de medição;
- **Desligamento de LT**: energia próxima a zero em todos os pontos de medição;
- **Salto com oscilação entre áreas**: parte dos pontos de medição apresentam energia positiva e parte apresentam energia negativa;
- **Ilhamento**: energia com valor elevado nos pontos de medição do subsistema isolado;

Para cada PMU, a energia contida entre os níveis 1 a 4 e 5 a 7 são encontradas pela somatória da energia contida em cada nível, conforme:

$$E_L = \sum_{j=1}^4 E_j \quad [Hz^2] \quad (4.13)$$

$$E_H = \sum_{j=5}^7 E_j \quad [Hz^2] \quad (4.14)$$

Com base nestas características, a primeira etapa do processo de classificação é realizada por meio de um sistema especialista, baseado em lógica condicional, utilizando um valor de *thresholds* (denominado *Thr_Clas*) para indicar o tipo de evento. Todavia, a definição do *Thr_Clas* para eventos do tipo ilhamento não é uma tarefa trivial, pois, geralmente, as frequências entre as ilhas se afastam e as energias do sistema isolado se tornam altas.

Entretanto, há registros como, por exemplo, o segundo evento da Figura 4.13, destacado em verde, no qual as frequências das ilhas formadas se afastam pouco, resultando, assim, em energias com valores próximos às energias calculadas para eventos do tipo perda de geração, perda de carga ou salto.

Há casos em que, na ocorrência de um evento, alguma PMU perde a comunicação com o SMSF e a medida da frequência passa a ser

apenas ruído (ou zero). Assim, a energia do sinal correspondente a essa PMU se torna elevada, podendo ocasionar falsas detecções de ilhamento, conforme a Figura 4.14.

Figura 4.13 – Dois eventos do tipo Ilhamento em sequência.

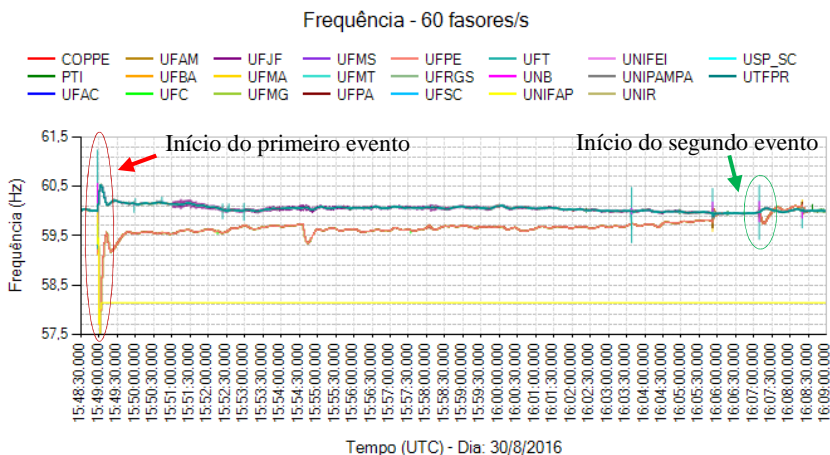
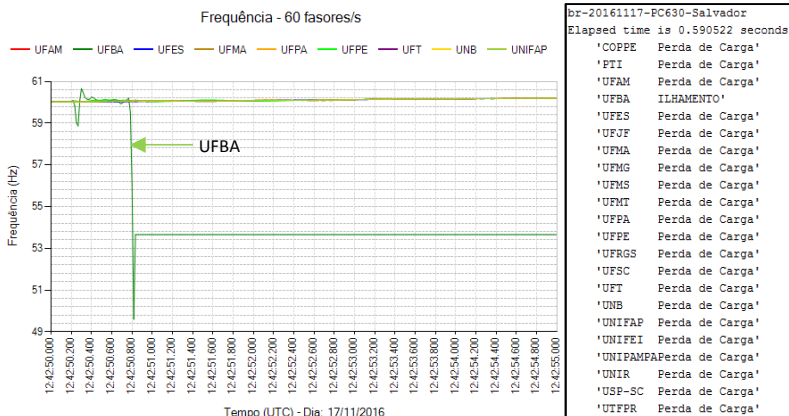


Figura 4.14 – Perda de 630 MW de carga em Salvador no dia 17/11/2016.



A fim de evitar a falsa classificação de ilhamento pela energia da TWD, deve-se agregar à metodologia, requisitos adicionais. Trabalhos como de Zimmer (2013) e Brustolin (2013) utilizam a diferença angular para confirmar um ilhamento no instante em que há a passagem por

$\pm 180^\circ$, conforme ilustrado na Figura 3.15. O tempo necessário para a ocorrência dessa ultrapassagem no SIN geralmente é inferior a 2 segundos. Deste modo, ao detectar um evento, verifica-se a diferença angular entre os sinais das PMUs ao longo de 1,8 segundos de dados pós evento, tempo utilizado no cálculo das energias da TWD. Se durante esse tempo houver a ultrapassagem dos limites de $\pm 180^\circ$, é confirmado um ilhamento na região da PMU.

Na primeira etapa do processo de classificação de eventos, a energia contida nos níveis mais elevados E_H dos coeficientes de detalhe da TWD e a diferença angular, utilizando 1,8 segundos de dados pós-evento é utilizado. Na Figura 4.15 é apresentado um fluxograma relativo a implementação computacional da primeira etapa da classificação de eventos. Os principais passos envolvidos no processo de classificação de eventos se resumem em:

- 1) Para cada PMU, calcular as energias:

$$E_j = \sum_{k=1}^{N_j} |cD_{j,k}[n]| \cdot |cD_{j,k}[n]| \quad [Hz^2], \text{ para } j = 1, 2, 3 \text{ e } 4,$$

$$E_j = \sum_{k=1}^{N_j} |cD_{j,k}[n]| \cdot cD_{j,k}[n] \quad [Hz^2], \text{ para } j = 5, 6 \text{ e } 7,$$

$$E_L = \sum_{j=1}^4 E_j \quad [Hz^2] \quad \text{e} \quad E_H = \sum_{j=5}^7 E_j \quad [Hz^2]$$

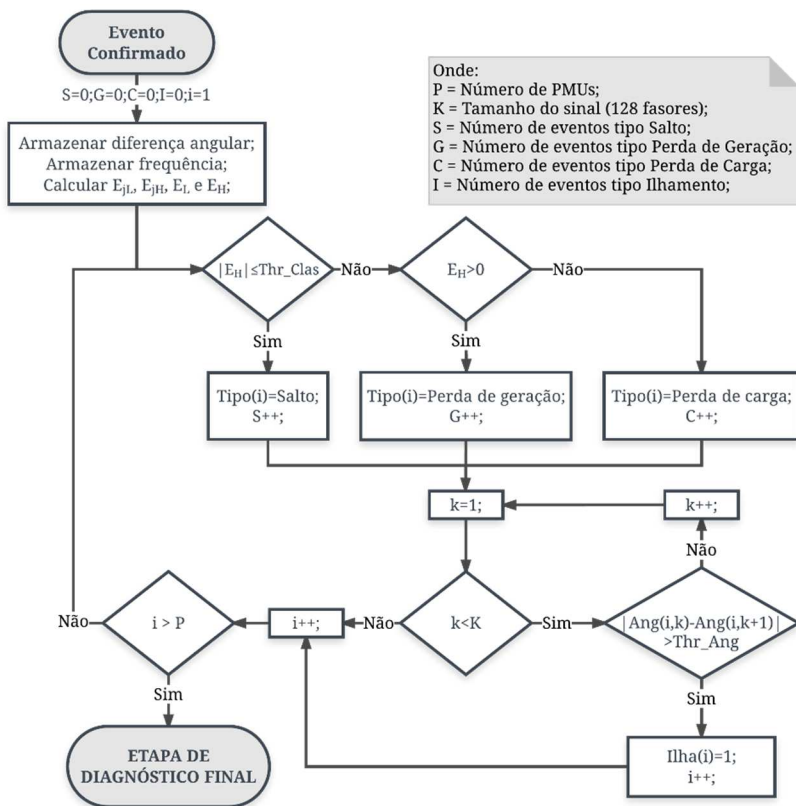
- 2) Comparar E_H com o Thr_Clas :

- se $E_H > Thr_Clas \rightarrow$ **Perda de Geração**;
- se $E_H < -Thr_Clas \rightarrow$ **Perda de Carga**;
- senão \rightarrow **Salto**;

- 3) Verificar a ocorrência de ilhamento pela diferença angular.

Após confirmado um evento, armazenam-se 128 amostras de dados da frequência e defasagem angular, sendo destas 20 amostras pré-evento e 108 amostras pós-evento. Calculam-se as energias para os sinais da frequência (Equações 4.11 a 4.14) de todos os pontos de medição.

Figura 4.15 – Fluxograma da Primeira Etapa da Classificação de Eventos.



Para cada ponto de medição i compara-se a E_H com o Thr_Clas . Caso a E_H seja menor do que o Thr_Clas , o evento nesta PMU é classificado como um salto. Caso seja maior e positivo, o evento é classificado como uma perda de geração e, caso seja maior e negativo, o evento é classificado como uma perda de carga. Em sequência, a condição de ilhamento é verificada pela análise da diferença angular, no. Ao ocorrer um ilhamento, haverá a transição entre $\pm 180^\circ$ na defasagem angular, cujo instante é detectado pelo Thr_Ang .

Contadores são adicionados para verificar a quantidade dos tipos de eventos classificados individualmente. O tipo do evento em cada PMU é armazenado na variável “Tipo” para ser apresentado posteriormente ao relatório final. A definição do sinal referência é de extrema importância nesta etapa. A princípio, definiu-se o sinal da PMU

UNB por se encontrar geograficamente e eletricamente na região central do SIN. Caso essa PMU esteja indisponível, o algoritmo seleciona de forma automática o sinal de outra PMU.

O *Thr_Clas* é responsável por limitar a magnitude dos eventos a serem classificados como perda de carga ou geração. Caso este limiar seja muito grande, pequenas perdas de geração ou carga poderão ser classificados como saltos e, caso seja muito pequeno, saltos em instantes em que a excursão natural da frequência esteja acentuada podem ser classificados como perda de geração ou carga. De forma empírica, após a análise de diversos eventos registrados pelo SMSF MedFasee BT, definiu-se o valor do *Thr_Clas* entre 0,002 e 0,005 Hz².

4.3.2. Segunda Etapa: Diagnóstico Final do Evento no SIN

Esta etapa é responsável por analisar a quantidade de eventos classificados pelas diversas PMUs do SMSF e então fazer o diagnóstico final do tipo de evento que ocorreu no SIN.

Em eventos do tipo perda de geração ou carga, a dinâmica da frequência de todo o sistema se comporta de forma semelhante, sendo assim, todas as regiões deveriam indicar o mesmo tipo de evento. Caso parte indique perda de geração e outra indique perda de carga, é evidente a ocorrência de uma oscilação entre áreas.

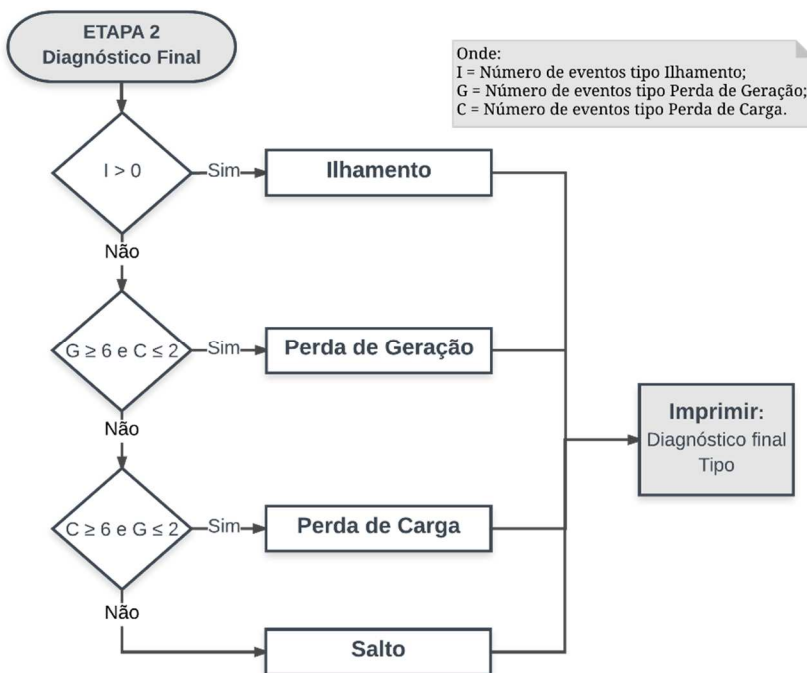
Por intermédio desta lógica, para o SMSF MedFasee BT, os principais passos envolvidos no diagnóstico final do evento se resumem em:

- 1) Se há alguma região em ilhamento → **Ilhamento**;
- 2) Senão, se $PG \geq 6$ e $PC \leq 2$ → **Perda de Geração**;
- 3) Senão, se $PC \geq 6$ e $PG \leq 2$ → **Perda de Carga**
- 4) Senão → **Salto**
- 5) Imprimir diagnóstico.

Um pseudo algoritmo desenvolvido para a etapa da classificação de eventos é apresentado no Apêndice B.2. Na Figura 4.16 é apresentado um fluxograma relativo a implementação computacional deste algoritmo.

Ressalta-se que os critérios utilizados nesta etapa foram ajustados especificamente para as características do SMSF MedFasee BT.

Figura 4.16 – Fluxograma da Segunda Etapa da Classificação de Eventos.



4.4. LOCALIZAÇÃO DE EVENTOS

Na ocorrência de eventos em SEE, geralmente, as grandezas elétricas registradas pelas PMUs próximas ao local do evento registram as maiores variações abruptas e saltos no sinal da frequência. Tais variações são refletidas nas energias dos coeficientes de detalhe da TWD. Dessa forma, é possível relacionar a energia destes coeficientes com a localização do evento.

Em Kim, 2015, Chen et al., 2015a e 2015b, utilizou-se da energia dos coeficientes de detalhe da TWD, calculados no sinal da frequência, para identificar o ponto de medição, cujo sinal registrado pela PMU apresenta a maior energia, sendo esta, considerada como a PMU mais próxima ao evento.

No presente trabalho, desenvolveram-se duas abordagens para a estimação da PMU mais próxima ao evento.

- **Relação com a energia calculada na etapa de detecção:** a PMU correspondente ao maior valor de EWM, calculado no processo de detecção do evento, será considerada como a PMU mais próxima do local da ocorrência do evento;

- **Relação com a energia calculada na etapa de classificação:** a PMU correspondente ao maior valor de E_L , calculado no processo de classificação do evento, será considerada como a PMU mais próxima do local da ocorrência do evento.

4.5. ESTIMADOR DA MAGNITUDE DO EVENTO

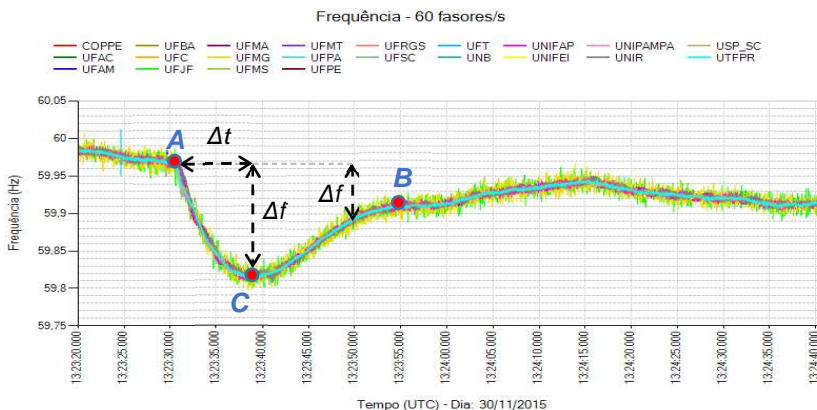
Para estimar a magnitude dos eventos utilizaram-se duas metodologias. Ambas as metodologias são baseadas na comparação com a magnitude de eventos passados. Assim, faz-se necessária a manutenção de um banco de dados contendo informações de eventos passados, como o sinal da frequência e a magnitude (em MW) exata dos eventos. Para isso, os eventos passados, registrados pelo SMSF MedFasee BT, cuja magnitude foi reportada pelo operador (ONS), foram organizados em uma planilha no programa *Excel* que hoje conta com 88 eventos. Por meio de retas de tendências, geradas pelo *Excel*, relaciona-se a magnitude dos eventos com parâmetros, calculados pelas metodologias desenvolvidas.

Na primeira metodologia, utiliza-se a relação da característica da resposta da frequência após a ocorrência do evento com a magnitude dos eventos do registro histórico. Dois parâmetros podem ser utilizados, a taxa de variação da frequência e a diferença entre a frequência pré e pós evento em regime permanente. Já na segunda metodologia, utiliza-se a relação entre as energias dos coeficientes de detalhe dos níveis mais elevados (E_H) da decomposição wavelet, calculadas durante o processo de classificação de eventos.

4.5.1. Relação da Magnitude do Evento com a Resposta da Frequência

Ao analisar os gráficos da frequência, durante a ocorrência de eventos do tipo perda de carga e/ou geração, é possível se observar que há três pontos característicos na excursão da frequência, conforme ilustrado na Figura 4.17 (A, B e C).

Figura 4.17 – Pontos de interesse para a estimação da magnitude do evento.



Segundo o NERC (2011) estes pontos são classificados como:

- **ponto A**: frequência pré evento, geralmente a frequência nominal, 50 ou 60 Hz;
- **ponto B**: frequência pós evento em regime permanente, em geral, caracterizada 15 segundos após o ponto A para o SIN;
- **ponto C**: ponto de máxima excursão da frequência, geralmente situado entre 4 a 10 segundos após o ponto A para o SIN.

Destes pontos, pode-se fazer duas relações entre a magnitude do evento com a resposta da frequência pós evento.

- **Pontos A e B**: variação da frequência (Δf) entre os regimes permanentes pré e pós evento;
- **Pontos A e C**: taxa de variação da frequência (df/dt) imediatamente após evento.

Em Dong (2008), realizou-se um estudo com o sistema leste norte-americano (*Eastern Interconnection*) contendo 129 eventos históricos. As duas relações supracitadas foram analisadas. Na primeira, relaciona-se a magnitude dos eventos históricos com a variação de frequência (Δf) e, na segunda com a taxa de variação da frequência (df/dt). Por meio de um polinômio de primeira ordem, traçou-se uma

reta de tendência, cuja equação é utilizada para estimar a magnitude de novos eventos.

Na relação entre os pontos A e B, é necessário que a frequência volte a operar em regime permanente, o que pode levar 15 segundos ou mais de tempo, provocando atrasos ao estimador. No presente trabalho, orientada a utilização em tempo real, aplicou-se, apenas, a relação entre os pontos A e C.

• Relação Entre os Pontos A e B

Nesta relação utiliza-se o valor calculado de Δf entre os pontos A e B e a magnitude dos eventos históricos para se estimar o parâmetro de sensibilidade carga/frequência (β), conforme Equação 4.15. O valor de Δf entre os pontos A e B é inversamente proporcional à dimensão inercial do sistema, quanto maior for a inércia menor será o desvio de frequência (DONG, 2008).

$$\beta = -\Delta P / \Delta f \quad [MW/Hz] \quad (4.15)$$

onde:

ΔP : montante de geração/carga perdida;

Δf : desvio de frequência entre os pontos A e B.

Com o parâmetro β calculado, a Equação 4.15 pode ser reorganizada conforme Equação 4.16. Assim, a cada novo evento, calcula-se o Δf e, então, a magnitude do evento pode ser estimada.

$$\Delta P = -\beta \cdot \Delta f \quad [MW] \quad (4.16)$$

No entanto, o parâmetro β depende das propriedades dinâmicas das turbinas, dos reguladores de velocidade, das cargas e de outros dispositivos de controle (NERC, 2011). Assim, recomenda-se, para agregar maior confiabilidade ao método, fazer uma relação entre ΔP e Δf de todos os eventos históricos e traçar uma reta de tendência, por meio de uma regressão linear $\Delta P = \beta \cdot \Delta f + P$, onde β é a inclinação da reta, em MW/Hz, P é a intersecção da reta no eixo vertical, em MW, e ΔP é a magnitude do evento, em MW.

• Relação Entre os Pontos A e C

Nesta relação utiliza-se a df/dt entre os pontos A e C e a magnitude dos eventos históricos para se estimar a inércia equivalente do sistema (ξ). Utilizando o valor de ξ , a relação é feita por intermédio da df/dt na equação de oscilação da máquina síncrona. Em simulações, o estimador calcula a magnitude do corte de carga/geração para cada unidade conectada ao sistema (ASHTON et al., 2015 e WALL et al., 2012). Porém, ao se trabalhar com SEE de grande porte, modelar todas as unidades geradoras não é uma tarefa trivial devido à quantidade de unidades geradoras e, também, pela dificuldade em se obter os parâmetros das máquinas, o que torna esta alternativa pouco atrativa. No entanto a inércia equivalente de um SEE pode ser estimada caso a frequência e a magnitude de um evento estiverem registradas (DONG, 2008).

A inércia equivalente representa o somatório da inércia de todas as máquinas do sistema. Para isso utiliza-se um modelo equivalente do SEE para se obter as equações de oscilação para um sistema multimáquinas, no qual todas as máquinas geradoras são reduzidas a apenas uma. Um sistema multimáquinas pode ser representado por um conjunto de geradores alimentando diversas cargas por meio de linhas de transmissão, conforme ilustrado na Figura 4.18. A equação de oscilação para o $i_{ésimo}$ gerador é representada pela Equação 4.17.

$$\frac{2H_i}{f_n} \frac{df_i}{dt} = P_{m_i} - P_{e_i} = \Delta P_i \quad (4.17)$$

onde:

- H_i : inércia da $i_{ésima}$ máquina (s);
- P_{m_i} : potência mecânica exercida pela $i_{ésima}$ turbina (pu);
- P_{e_i} : potência elétrica entregue pela $i_{ésima}$ máquina (pu);
- ΔP_i : desvio de potência da $i_{ésima}$ máquina;
- f_i : frequência do $i_{ésimo}$ gerador (Hz);
- f_n : frequência nominal (Hz).

O modelo equivalente desse sistema pode ser representado como na Figura 4.19. A equação de oscilação para o sistema equivalente é representada conforme Equação 4.18.

$$\Delta P = \sum_{i=1}^N \Delta P_i = \frac{2 \sum_{i=1}^N H_i}{f_n} \frac{df_c}{dt} \rightarrow \boxed{\Delta P = \xi \cdot df_c/dt} \quad [MW] \quad (4.18)$$

onde:

$$\xi = \frac{2}{f_n} \cdot \sum_{i=1}^N H_i \quad [s] \quad (4.19)$$

$$f_c = \frac{\sum_{i=1}^N H_i \cdot f_i}{\sum_{i=1}^N H_i} \quad [Hz] \quad (4.20)$$

sendo:

ξ : inércia equivalente do sistema (s).

f_c : frequência equivalente do centro de inércia (Hz);

Figura 4.18 – Representação de um sistema multimáquinas.

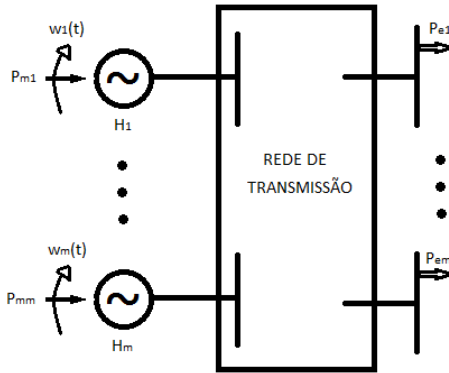
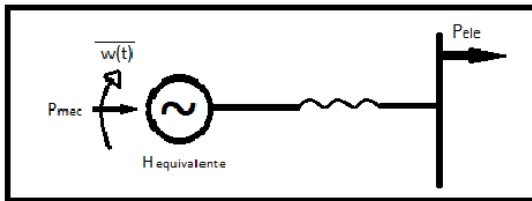


Figura 4.19 – Representação do modelo multimáquinas equivalente.



A Equação 4.18, representa a relação entre a taxa de variação da frequência e a inércia equivalente do sistema diretamente com a

magnitude da variação de potência ativa do sistema. Reorganizando a Equação 4.18 para encontrar a inércia, tem-se:

$$\xi = \frac{\Delta P}{df_c/dt} \quad [s] \quad (4.21)$$

Com o parâmetro ξ calculado, a Equação 4.21 pode ser reorganizada conforme Equação 4.22. Assim, a cada novo evento, calcula-se df_c/dt e, então, a magnitude do evento pode ser estimada.

$$\Delta P = \xi \cdot df_c/dt \quad [MW] \quad (4.22)$$

Em Zarzosa (2016), escolheram-se manualmente eventos que ocorreram em datas e horários semelhantes para se estimar a inércia equivalente do sistema e, então, estimar a magnitude do evento pela Equação 4.22. No entanto, as metodologias desenvolvidas no presente trabalho têm por premissa a operação em tempo real, desta forma um modo automático deve ser utilizado. Neste sentido, utiliza-se uma relação linear entre ΔP e df_c/dt de todos os eventos do registro histórico.

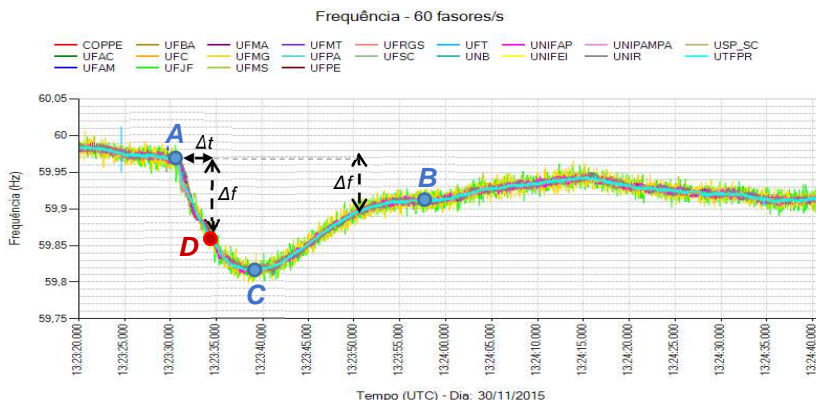
Estimar o valor da frequência equivalente do centro de inércia foi um dos principais desafios no desenvolvimento desta metodologia, uma vez que pequenos erros podem introduzir grandes erros na estimativa. A taxa de variação da frequência entre os pontos A e C, da Figura 4.17, não depende apenas da inércia equivalente do sistema, uma vez que a partir de 2 a 4 segundos, a frequência passa a sofrer influência das cargas, que desaceleram devido ao decaimento da frequência, e consequentemente demandam menos energia. Além disso, ações de controle, como a atuação dos reguladores de velocidade, também influenciam na excursão da frequência após este tipo de evento (NERC, 2011).

Optou-se por utilizar a mesma janela utilizada na etapa de classificação, contendo 128 fasores, ou seja, a 1,8 segundos após o início do evento. Portanto, o cálculo da df_c/dt é realizado entre os pontos A e D, conforme ilustrado na Figura 4.20. Neste intervalo de tempo, o decaimento da frequência depende predominantemente da inércia do sistema.

Por ser uma janela pequena, quaisquer ruídos ou grandes oscilações provocam grandes erros no cálculo, como por exemplo, os sinais que apresentaram saltos e oscilações no evento representado na

Figura 4.21. Geralmente os sinais com saltos apresentam maiores oscilações na frequência após o início do evento, podendo ter valores distantes da “frequência média”.

Figura 4.20 – Pontos de interesse para o cálculo da taxa de variação.



No presente trabalho foi proposto um método para calcular a taxa de variação da frequência equivalente do centro de inércia utilizando apenas os sinais sem oscilação. Deste modo, a df_c/dt é definida como a média da df/dt dos sinais de frequência com menor energia nos coeficientes de detalhe dos menores níveis da TWD (E_L), pois nestes níveis são extraídos ruídos e grandes oscilações. Para o SIN, optou-se por utilizar a df/dt das cinco PMUs com menor E_L . Assim, por exemplo, o cálculo da df_c/dt é feito de acordo com a linha pontilhada em vermelho na Figura 4.21.

Para cada sinal, o cálculo compara a média dos 10 primeiros valores da janela da frequência com a média dos 10 últimos pelo tempo percorrido, equivalente a 1,8 segundos (108 fasores). A janela utilizada para o cálculo é ilustrada na Figura 4.22.

Na Figura 4.23 é apresentado a relação entre a df_c/dt com a magnitude de 71 dos 88 eventos armazenados no registro histórico, pois alguns registros antigos apresentam grande discrepância entre a magnitude registrada com a df_c/dt .

Figura 4.21 – PMUs consideradas para o cálculo da df/dt .

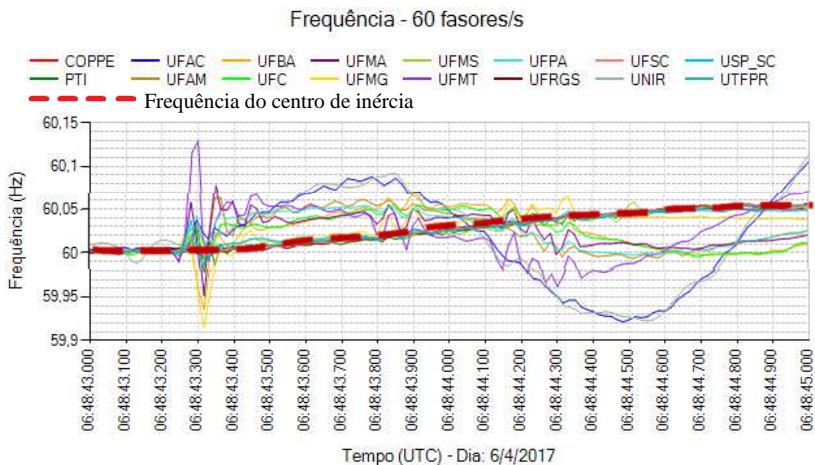


Figura 4.22 – Janela utilizada para o cálculo da taxa de variação da frequência.

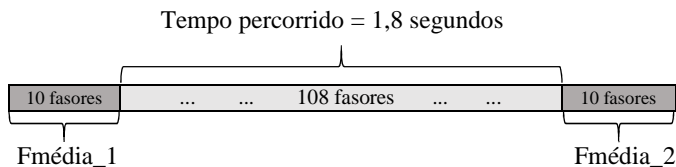
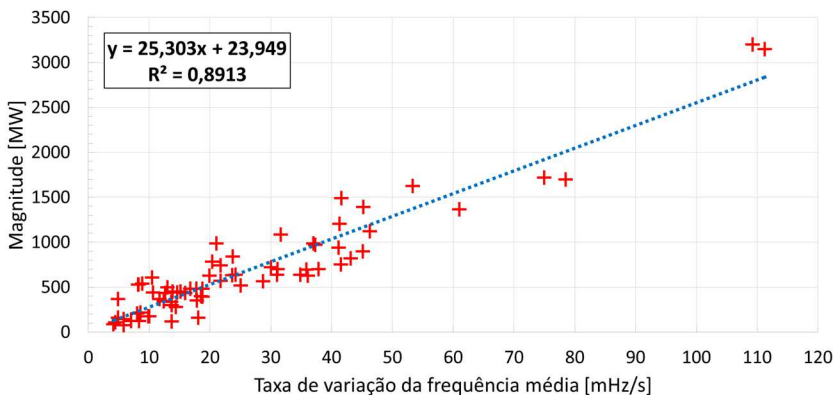


Figura 4.23 – Relação entre a magnitude de eventos com a df_c/dt .

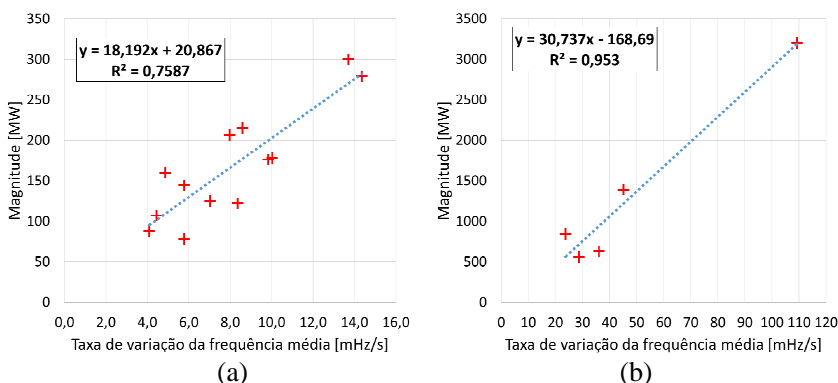


Observa-se a existência de uma relação aproximadamente linear, entretanto há dispersões quanto a df_c/dt com eventos de magnitudes próximas. Isso se dá pelo fato da característica de resposta da frequência depender da inércia do sistema, a qual é diretamente influenciada pelo patamar de carga (leve, médio ou pesado) no instante do evento. Portanto, para uma estimação mais apurada, os eventos devem ser separados de acordo com o patamar de carga do sistema (estação do ano, horário, datas especiais, dia da semana, etc), e sendo a equação da reta de tendência diferente para diferentes perfis de carga do SEE (DONG, 2008).

O registro histórico possui pouca quantidade de eventos, registrados a partir de 2009. O SIN vem passando por grandes mudanças com a inserção de novas fontes de geração, alterando sua inércia equivalente. Assim, no presente trabalho, estas considerações não foram utilizadas.

Na Figura 4.24 foram traçados gráficos contendo apenas os eventos mais recentes, registrados a partir de outubro de 2016, com magnitude (a) inferior e (b) superior a 500 MW, totalizando doze e seis eventos, respectivamente. Utilizaram-se apenas eventos recentes, pois estes foram reportados pelo ONS e obtiveram melhores resultados.

Figura 4.24 – Relação entre a magnitude de eventos (a) inferior e (b) superior a 500 MW com a df_c/dt .



Ao observar a Figura 4.24 nota-se que eventos com magnitude inferior a 500 MW apresentam df_c/dt inferior a 20 mHz/s, já eventos com magnitude superior a 500 MW apresentam df_c/dt superior a 20 mHz/s. Assim, para eventos com df/dt inferior a 20 mHz/s a estimação

da magnitude é calculada por intermédio da Equação 4.23. Já eventos com df/dt a partir de 20 mHz/s, a estimação da magnitude é calculada por intermédio da Equação 4.24.

$$\Delta P = 18,192 \cdot |df/dt| + 20,867 \quad (4.23)$$

$$\Delta P = 30,737 \cdot |df/dt| - 168,69 \quad (4.24)$$

onde a inclinação da reta é representada em GW.s^2 (ou $\text{GW}/(\text{mHz/s})$), a constante é a intersecção da reta no eixo vertical e ΔP é a magnitude do evento a ser estimada, ambas em MW.

A partir da ocorrência de um novo evento, calcula-se a df_c/dt e, ao substituir este valor na Equação 4.23 ou 4.24, a magnitude do novo evento é estimada. No Apêndice D.1 são apresentados os eventos utilizados e as estimações utilizando as diferentes equações.

4.5.2. Relação da Magnitude do Evento com a TWD

Conforme apresentado na Seção 4.1, os níveis mais elevados da TWD extraem as características da dinâmica do sinal. Desta forma, quanto maior o desequilíbrio de potência ativa causado pelo evento, maiores serão os efeitos na dinâmica do sinal da frequência e, por consequência, maior será a energia contida nos coeficientes correspondentes.

A energia de sinais contendo grandes oscilações ou ruídos, como os da Figura 4.21, não representam a dinâmica do centro de inércia. Deste modo, são considerados apenas os cinco sinais com as menores energias nos primeiros níveis da decomposição da TWD (E_L) para representar a energia dos níveis mais elevados do centro de inércia (E_{Hc}), os mesmos utilizados no cálculo da taxa de variação da frequência do centro de inércia do sistema.

Na Figura 4.25 é apresentada a relação entre a taxa de variação da frequência do centro de inércia (df_c/dt) com a energia do centro de inércia dos níveis mais elevados da TWD (E_{Hc}), calculados para os 88 eventos do registro histórico. Observa-se por meio da curva, representada por um polinômio de segundo grau, que a df_c/dt e a E_{Hc} possuem forte relação, deste modo é possível dizer que a E_H pode ser utilizada para se estimar a magnitude de eventos.

Na Figura 4.26 é apresentado (a) a relação entre a E_{Hc} com a magnitude de 84 dos 88 eventos armazenados no registro histórico.

Assim como a resposta da frequência, a E_{Hc} varia de acordo com a inércia do sistema no instante da ocorrência do evento, de modo que há grandes dispersões no gráfico, devendo-se assim, distinguir equações para cada patamar de carga. Entretanto devido ao relativamente baixo número de eventos disponíveis no histórico e a falta de tempo disponível para a realização destas análises optou-se por separar os eventos por magnitude.

Figura 4.25 – Relação entre a E_{Hc} e a df_c/dt .

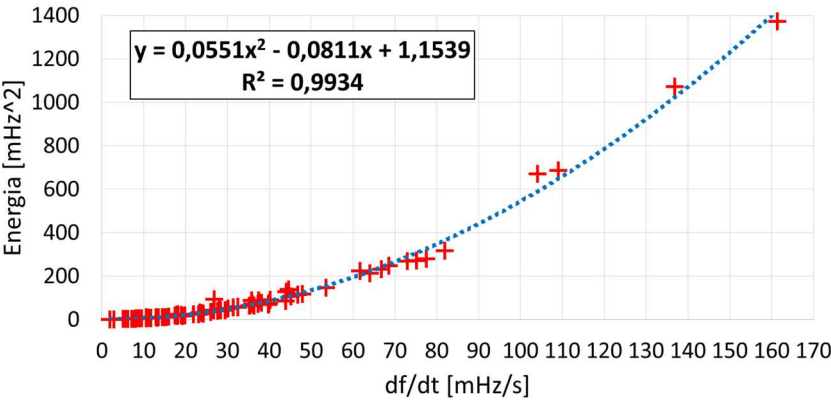
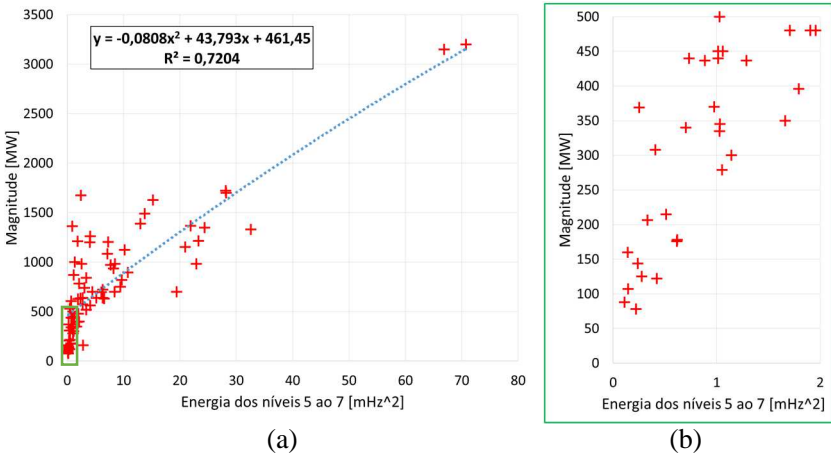
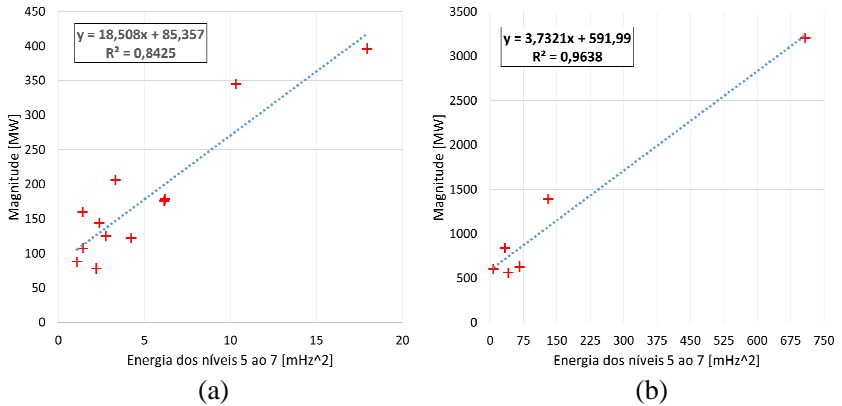


Figura 4.26 – Relação entre a magnitude de eventos com a E_{Hc} .



De modo análogo à metodologia anterior, utilizaram-se apenas os eventos mais recentes, registrados a partir de outubro de 2016, separados entre eventos com magnitude (a) inferior e (b) superior a 500 MW, totalizando doze e seis eventos respectivamente. Tais relações são apresentadas na Figura 4.27.

Figura 4.27 – Relação entre a magnitude de eventos (a) inferior e (b) superior a 500 MW com a E_{HC} .



Ao observar a Figura 4.27 nota-se que eventos com magnitude inferior a 500 MW apresentam E_{HC} inferior a 20 mHz^2 , já eventos com magnitude superior a 500 MW apresentam E_{HC} superior a 20 mHz^2 . Assim, para eventos com E_{HC} inferior a 20 mHz^2 a estimação da magnitude é calculada por intermédio da Equação 4.25. Já eventos com E_{HC} 20 mHz^2 , a estimação da magnitude é calculada por intermédio da Equação 4.26.

$$\Delta P = 18,508 * |E_{HC}| + 85,357 \quad (4.25)$$

$$\Delta P = 3,7321 * |E_{HC}| + 591,99 \quad (4.26)$$

onde a inclinação da reta é representada em GW/Hz^2 , a constante é a intersecção da reta no eixo vertical e ΔP é a magnitude do evento a ser estimada, ambas em MW.

A partir da ocorrência de um novo evento, calcula-se a E_{HC} e, ao substituir este valor na Equação 4.25 ou 4.26, a magnitude do novo

evento é estimada. No Apêndice D.2 são apresentados os eventos utilizados e as estimações utilizando as diferentes equações.

4.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, explorou-se a TWD em todas as etapas da análise automática de eventos. Para se fazer a detecção de eventos, utiliza-se o valor RMS da energia contida nos coeficientes de detalhe da TWD, utilizando três ou quatro níveis de decomposição, ao longo de uma janela deslizante no tempo contendo, respectivamente, oito ou dezesseis amostras de frequência. Com a energia wavelet normalizada (EWN) a definição de um *threshold* único para o sinal de todas as PMUs é possível. Considera-se um evento se mais do que uma região do sistema seja sensibilizada pelo evento e a duração de cada evento foi definida em 1 segundo.

Para a classificação de eventos, utiliza-se a energia contida nos coeficientes de detalhe da TWD dos níveis cinco ao sete (E_H), utilizando uma janela contendo 20 amostras passadas e 108 amostras pós-evento. A orientação da energia wavelet indica a dinâmica do sinal registrado por cada PMU e então, de acordo com o evento classificado em cada PMU o diagnóstico final do evento no SIN é concluído. Os critérios utilizados nesta etapa foram ajustados especificamente para as características do SMSF MedFasee BT, sendo necessário ajustes na metodologia de diagnóstico final para outros SMSF.

Para a localização do evento, optou-se por identificar as PMUs mais próximas do evento. Utilizaram-se duas estratégias, ambas com a energia contida nos coeficientes de detalhe TWD. A primeira utiliza a EWM, calculada na etapa de detecção de eventos e a segunda a E_L , calculada na etapa de classificação.

Na estimação da magnitude dos eventos, utilizaram-se duas estratégias. Ambas comparam a magnitude de um registro histórico contendo eventos passados com outro parâmetro específico. Na primeira, utiliza-se como parâmetro a taxa de variação média da frequência do centro de inércia (df_c/dt) na equação de oscilação da máquina síncrona. Na segunda, utiliza-se como parâmetro a energia contida nos coeficientes de detalhe da TWD dos níveis cinco ao sete para o centro de inércia (E_{Hc}), calculada na etapa de classificação. Para o cálculo da df_c/dt e da E_{Hc} , utilizam-se a energia contida nos coeficientes de detalhe da TWD dos níveis uma ao quatro (E_L) para remover os sinais com presença de ruídos ou grandes oscilações.

A relação entre a energia wavelet e a variação da frequência possui uma relação quadrática, desta forma, as discrepâncias utilizando a metodologia pela energia wavelet também são quadráticas.

5. RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se os resultados de experimentos de validação das metodologias descritas no capítulo anterior. No presente trabalho, as principais metodologias validadas são:

- 1) **Deteccão** de eventos por meio da energia wavelet normalizada do valor RMS dos coeficientes de detalhe da TWD dos níveis um a quatro (E_{WN}), utilizando janela deslizante de monitoramento;
- 2) **Classificação** de eventos por meio da energia wavelet dos coeficientes de detalhe da TWD dos níveis cinco a sete (E_H), utilizando janela de 128 amostras, contendo 20 amostras pré-evento e 108 amostras pós-evento, equivalente a 1,8 segundos de dados pós-evento;
- 3) **Localização** da PMU mais próxima ao evento por meio da energia wavelet não normalizada do valor RMS dos coeficientes de detalhe da TWD dos níveis um a quatro (E_{WM}), calculadas durante o processo de detecção de eventos;
- 4) **Localização** da PMU mais próxima ao evento por meio da energia wavelet dos coeficientes de detalhe da TWD dos níveis um a quatro (E_L), calculadas durante o processo de classificação de eventos;
- 5) **Estimação da magnitude** de eventos por meio da relação da com a energia wavelet dos coeficientes de detalhe da TWD dos níveis cinco a sete (E_H), calculados durante o processo de classificação de eventos;
- 6) **Estimação da magnitude** de eventos por meio da relação com a taxa de variação da frequência, calculados durante o processo de classificação de eventos;
- 7) **Cálculo da taxa de variação da frequência do centro de inércia (df_c/dt)** desconsiderando sinais com saltos e oscilações por meio da energia contida nos coeficientes de detalhe dos níveis mais baixos (E_L), calculadas durante o processo de classificação de eventos.

8) Cálculo da energia contida nos coeficientes de detalhe dos níveis mais elevados da decomposição para o centro de inércia E_{H_C} desconsiderando sinais com saltos e oscilações por meio da energia contida nos coeficientes de detalhe dos níveis mais baixos (E_L), calculadas durante o processo de classificação de eventos.

Inicialmente apresenta-se o ambiente computacional desenvolvido para a validação das metodologias no âmbito da análise *off-line* de eventos. Em sequência, a sensibilidade dos parâmetros a serem configurados para a aplicação no âmbito da análise em tempo real são analisados e definidos por meio da análise de alguns eventos registrados pelo SMSF MedFasee BT.

Após validadas as metodologias e definidos os parâmetros, apresenta-se o ambiente computacional desenvolvido para a aplicação das metodologias, no âmbito da análise em tempo real, para o monitoramento de eventos no SIN por intermédio do SMSF MedFasee BT. Por fim, são apresentados alguns eventos detectados e analisados pelas metodologias aplicadas em tempo real.

5.1. AMBIENTE DE EXPERIMENTAÇÃO

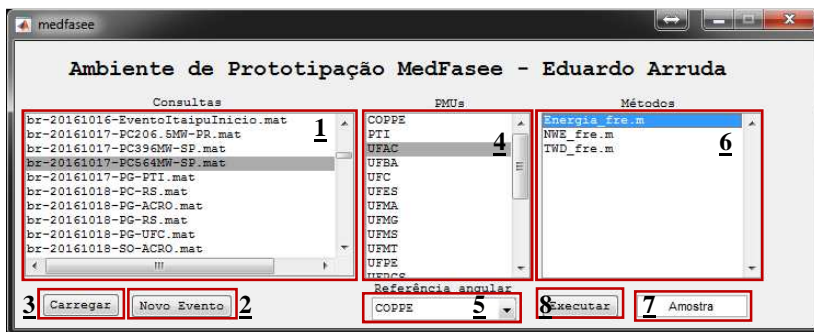
As metodologias de detecção, classificação, localização e estimação da magnitude de eventos foram integradas em uma interface gráfica de usuário (*Graphical User Interface* – GUI) implementada em linguagem MATLAB. O GUI foi adaptado de um GUI já existente no Projeto MedFasee/UFSC, denominado APMedFasee.

Na Figura 5.1 é apresentada a GUI utilizada. No campo 1 é armazenada a lista de eventos disponíveis para análise. O campo 2 tem por finalidade gerar novos eventos por meio de consultas de dados de eventos previamente realizadas no aplicativo MedPlot Histórico. Ao clicar em “carregar”, no campo 3, os dados da consulta selecionada são carregados e as PMUs que compõem a consulta são apresentadas no campo 4. No campo 5 seleciona-se a PMU cujo sinal será utilizado como referência angular. No campo 6 são apresentados os algoritmos implementados. No campo 7, deve-se digitar o número da amostra em que o evento se iniciou, informação utilizada no algoritmo classificador. O campo 8 executa o algoritmo selecionado.

No método “Energia_fre.m” estão implementados os cálculos da E_L , E_H e taxa de variação da frequência média do sistema. Neste método são realizadas as etapas de classificação de eventos, localização por

meio da E_L e estimação da magnitude por meio da E_H e, também, por meio da taxa de variação da frequência média. No método “NWE_fre.m” estão implementados os cálculos da EWM e EWN. Neste método são realizadas as etapas de detecção de eventos e localização por meio da EWM. O método “TWD_fre.m” realiza uma simples decomposição wavelet no sinal da frequência. Os parâmetros são configurados diretamente no código implementado.

Figura 5.1 – Ambiente computacional para validação metodológica.



Para as análises no âmbito da validação das metodologias e na definição dos parâmetros, são utilizados eventos, cujas informações referentes à data, hora, localização e tipo estão descritas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Eventos utilizados no ambiente de experimentação

Nº	Data	Horário (UTC)	Tipo	Mag. (MW)	Local	Observações
01	13/09/16	10:40:50	PC	88	DF	Desligamento de LTs de 230 kV - Brasília Sul/Brasília Geral C1 e C2
02	17/10/16	19:56:27	PC	564	SP	Desligamento automático de equipamentos nos setores de 345 e 88 kV da subestação Nordeste
03	14/10/16	17:19:13	PC	605	AM	Desligamento total da rede de distribuição de 69 kV Manaus
04	19/10/16	19:55:10	PC	78	MG	Desligamento dos setores de 345 e 135 kV na região norte de MG

05	30/08/16	15:48:57	Ilha	-	TO	Abertura de 2 LTs de 500 kV da interligação norte-nordeste. ERAC 3500 MW + PG 2300 MW
06	06/04/17	06:48:43	PC	157,7	DF	Desligamento da transformação 345/138 kV e de LTs de 138 kV em Brasília
07	26/10/16	16:07:35	PC	3200	PR/SP	Desligamento de LTs 345 kV e da transformação 765/345 kV da subestação Tijuco Preto (FURNAS)

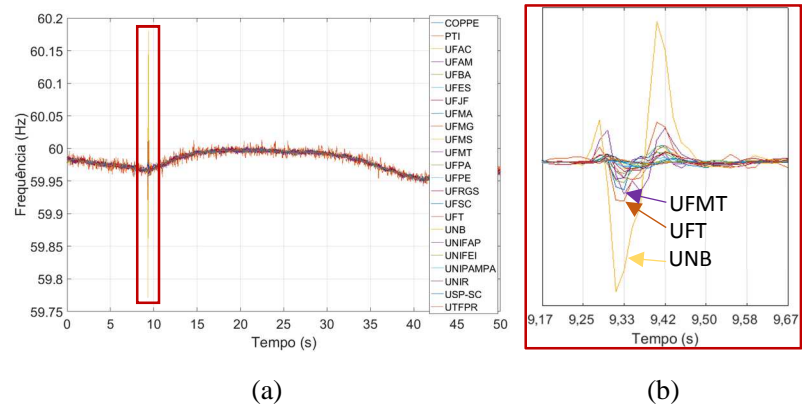
5.1.1. Estudo 1 – Análise das Energias EWM e EWN

Este estudo tem por objetivo analisar as diferenças entre a EWM e a EWN, bem como apresentar resultados nas etapas de detecção de eventos e localização da PMU mais próxima por meio da EWM.

• Caso A

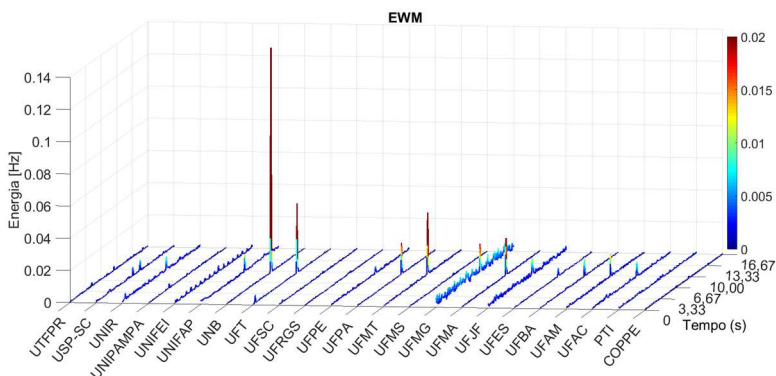
Na Figura 5.2 são apresentados a (a) excursão e o (b) detalhe do instante inicial das frequências ao longo do **Evento 01**, ocorrido em Brasília/DF. Nas Figuras 5.3 são apresentadas as energias (a) EWM e (b) EWN utilizando três níveis de decomposição wavelet.

Figura 5.2 – (a) Frequências e (b) detalhes do instante inicial do Evento 01.

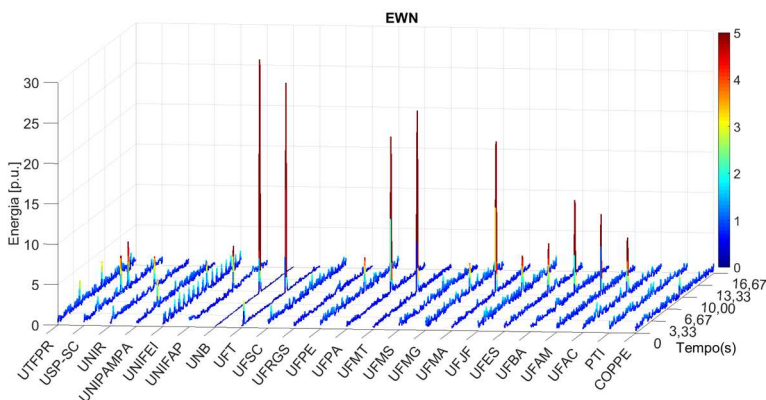


Na Figura 5.3 (a) é possível observar a presença de saltos na EWM de quinze PMUs, entretanto a definição de um *threshold* único para a detecção deste evento em todos os sinais não é trivial. Caso este *threshold* for 0,02 Hz, percebe-se por meio da legenda de cor que o evento seria detectado em apenas quatro PMUs. Já na Figura 5.3 (b) a energia normalizada (EWN) mostra-se muito mais sensível ao evento. Utilizando um *threshold* de 5 p.u., o evento pode ser detectado no sinal de doze PMUs.

Figura 5.3 – (a) EWM e (b) EWN do Evento 01.



(a)

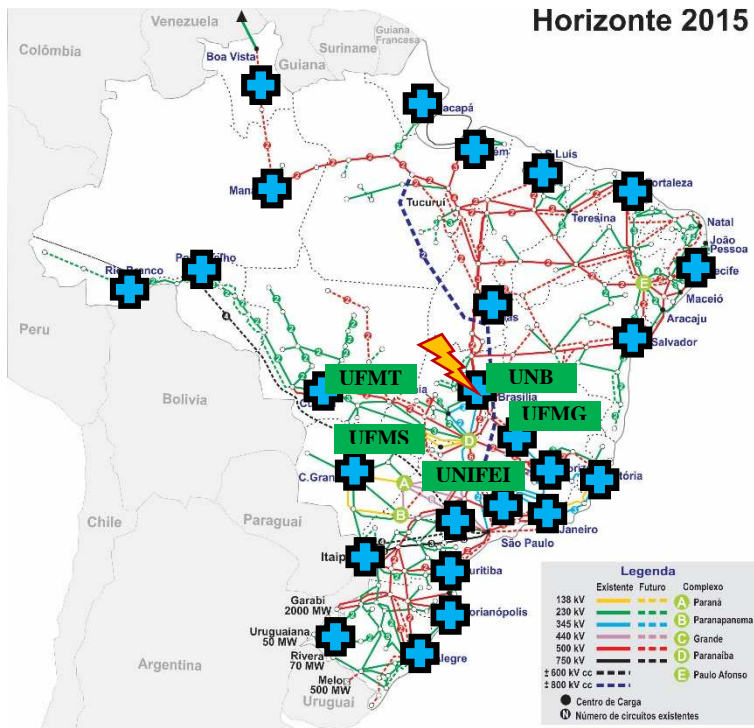


(b)

Outra observação que pode ser analisada é a discrepância entre a EWM da PMU UNB com as demais. Tal discrepância não ocorre com a

EWN. Ainda, as três maiores EWM e EWN correspondem às PMUs UNB, localizada na cidade de Brasília/DF (local da ocorrência do evento), UFT no Tocantins e UFMT no Mato Grosso. Todavia, devido à discrepância, a EWM fornece com maior precisão a PMU eletricamente mais próxima ao local do evento. Na Figura 5.4 é apresentado o mapa do sistema elétrico brasileiro, destacando-se em azul a localização de todas as PMUs do SMSF MedFasee BT. Ainda nesta figura, a localização aproximada do evento e das cinco PMUs com maiores EWM estão destacadas.

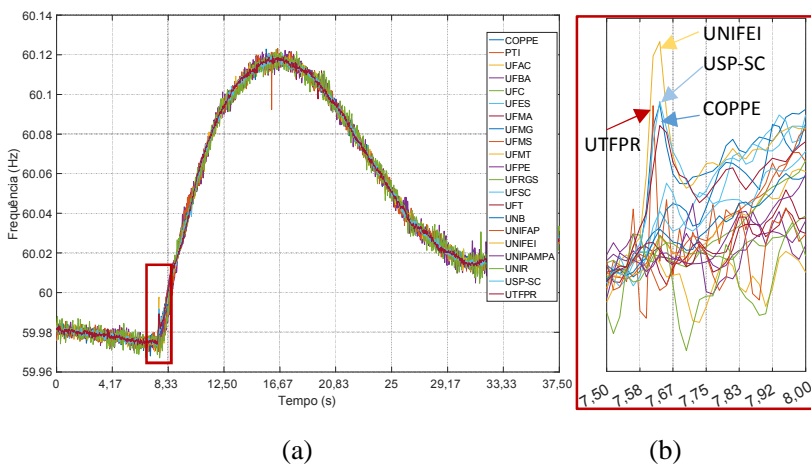
Figura 5.4 – Localização do Evento 01.



• Caso B

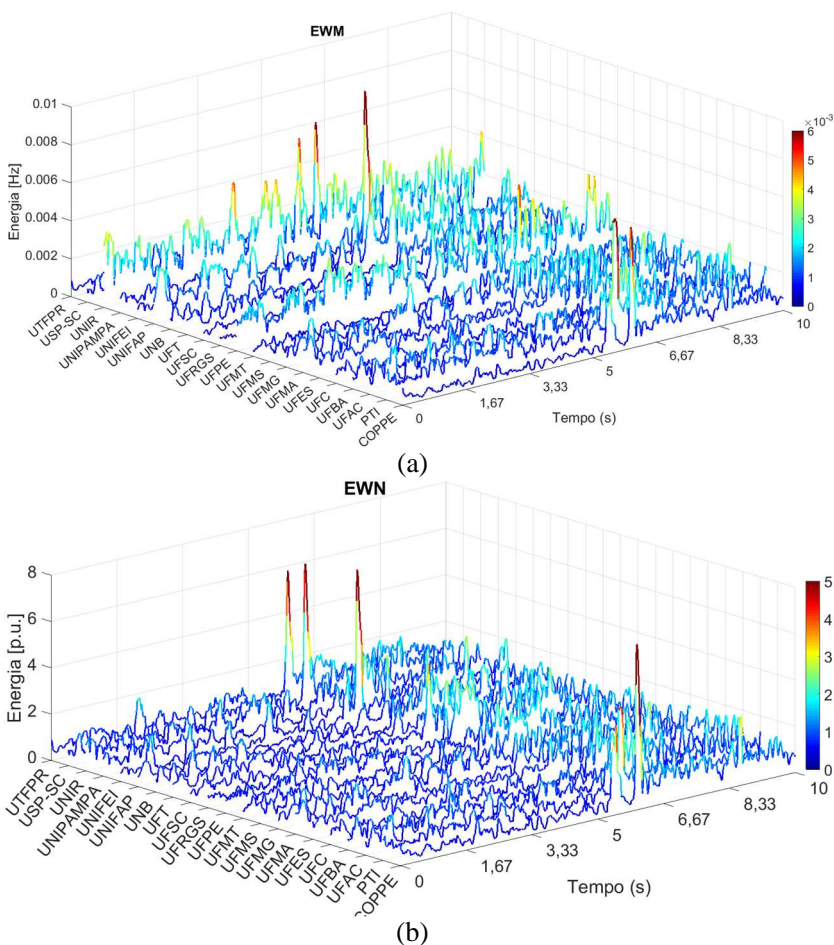
Na Figura 5.5 são apresentados a (a) excursão e o (b) detalhe do instante inicial das frequências ao longo do **Evento 02**, na região metropolitana de São Paulo.

Figura 5.5 – (a) Frequências e (b) detalhes do instante inicial do Evento 02.



Na Figura 5.6 são apresentadas as energias (a) EWM e (b) EWN. Nota-se uma grande redução no ruído quando a energia é normalizada, tornando a detecção mais confiável por meio da utilização da EWN. No entanto, a PMU UNIFEI apresentou uma EWM relativamente maior do que as outras PMUs se comparado com a EWN. A segunda e terceira maiores EWM correspondem a COPPE e USP-SC.

Figura 5.6 – (a) EWM e (b) EWN do Evento 02.



Na Figura 5.7 é apresentado o mapa do sistema elétrico brasileiro, destacando-se em azul a localização de todas as PMUs do SMSF MedFasee BT. Ainda nesta figura, a localização aproximada do evento e das cinco PMUs com maiores EWM estão destacadas.

Uma última análise compara a quantidade de níveis de decomposição na etapa de detecção de eventos. Na Figura 5.8 apresenta-se a EWN em (a) três e (b) quatro níveis de decomposição wavelet para os sinais da UNIFEI, USP_SC e UTFPR.

Figura 5.7 – Localização do Evento 02.

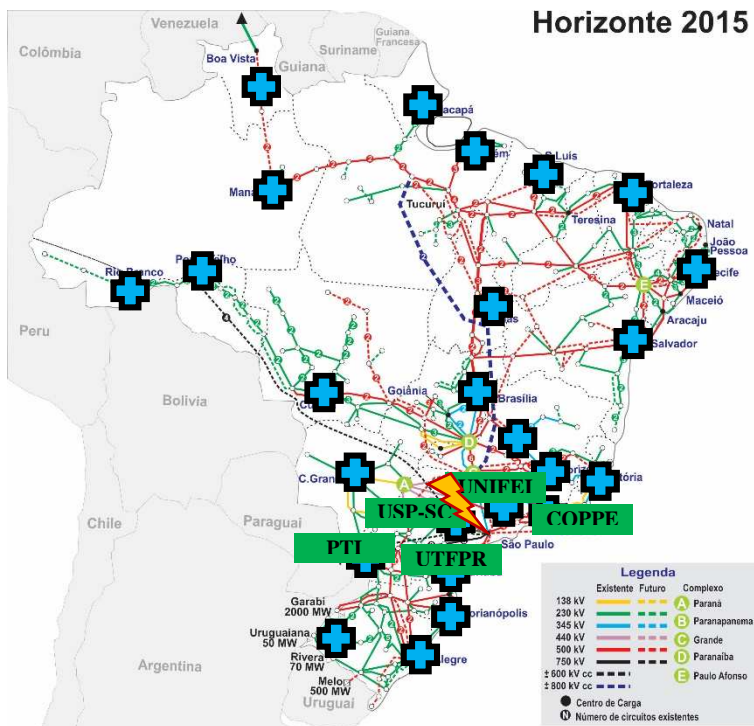
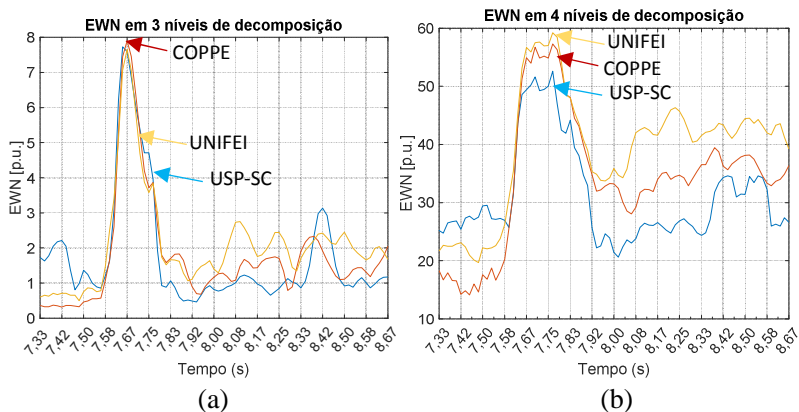


Figura 5.8 – Comparação da EWN com (a) 3 e (b) 4 níveis de decomposição.



A escolha do nível de decomposição da TWD é de extrema importância. Na ocorrência de um evento a EWN irá se elevar e se manter elevada até todo o evento percorrer a janela deslizante. O tamanho da janela utilizada é potência de dois do nível de decomposição escolhido, ou seja, quanto maior o nível de resolução, maior será a janela. Assim, quanto maior o nível maior será o tempo para a EWN retornar a patamares semelhantes aos de antes do evento, conforme pode ser observado na Figura 5.8. Como a metodologia só confirma a ocorrência de um evento quando a EWN de dois ou mais pontos de medição ultrapassam o *Thr_Det*, essa demora pode ocasionar a detecção de falsos eventos sistêmicos.

Além disso, a cada nível de decomposição a quantidade de cálculos necessários cresce significativamente, afetando o desempenho computacional, o que não é desejável. Assim, a utilização de três níveis de decomposição se mostrou mais adequada.

5.1.2. Estudo 2 – Análise das Energias E_L e E_H

Este estudo tem por objetivo analisar a sensibilidade do *threshold* de salto no processo de classificação de eventos por meio da E_H , validar os parâmetros configurados para o diagnóstico final do evento, considerando o SMSF MedFasee BT, e a localização da PMU mais próxima ao evento por meio da E_L .

• Caso A

Na Figura 5.9 é apresentada a excursão das frequências na janela do classificador de eventos para o **Evento 03**, ocorrido em Manaus/AM.

Na Figura 5.10 são apresentadas as energias (a) E_H e (b) E_L . A E_H apresenta valores negativos no sinal de todas as PMUs. Para este evento, utilizando até $0,005552 \text{ Hz}^2$ como *threshold*, todas os pontos de medição do sistema classificariam o evento como uma perda de carga.

Na Figura 5.10 (b) a PMU UFAM, localizada na cidade de Manaus/AM (local do evento), possui uma E_L muito superior do que as demais, sendo esta a localização exata do evento. Nota-se ainda, que a segunda e terceira maior E_L correspondem às PMUs UNIFAP e UFPA que estão eletricamente mais próximos ao local do evento, conforme ilustrado na Figura 5.11.

Figura 5.9 – (a) Frequências e (b) detalhes do instante inicial do Evento 03.

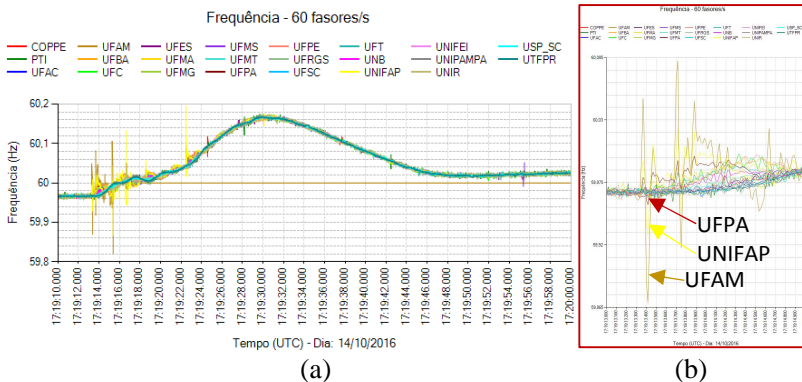


Figura 5.10 – (a) E_H e (b) E_L do Evento 03.

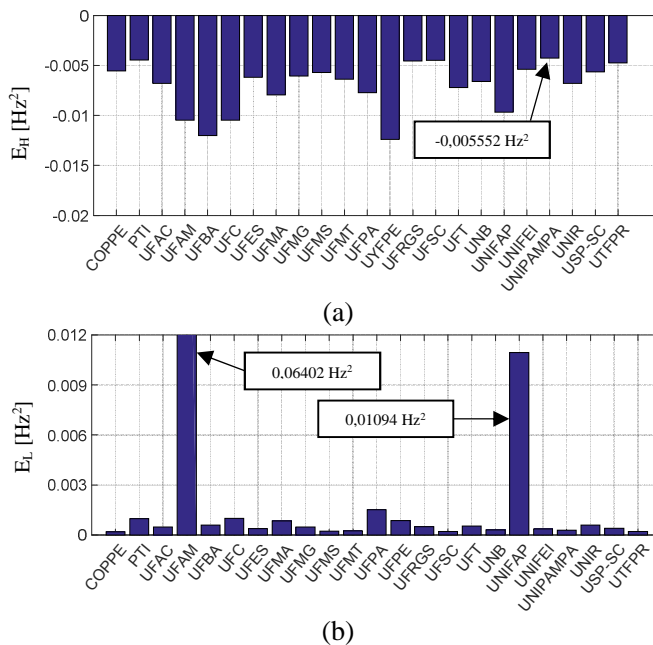
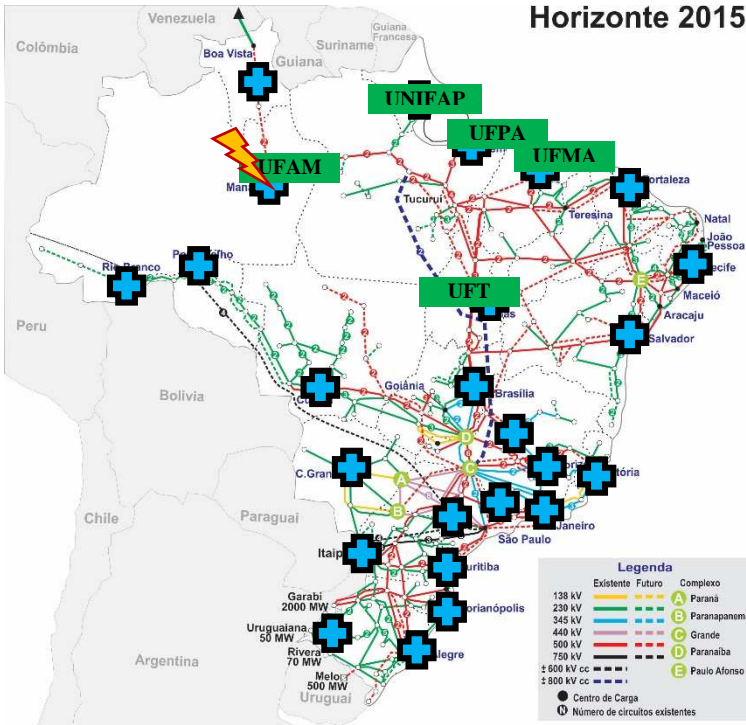


Figura 5.11 – Localização do Evento 03.



• Caso B

Na Figura 5.12 são apresentados a (a) excursão e o (b) detalhe do instante inicial das frequências ao longo do **Evento 04**, na região norte do estado de Minas Gerais.

Na Figura 5.13 (a) é apresentada a E_H do evento. Nota-se que ao utilizar o mesmo *threshold* do evento passado, todas as PMUs classificariam o evento como um salto. Isso ocorre devido ao fato deste evento ser de baixa magnitude e o impacto na frequência é muito menor do que em eventos grandes. Com o *threshold* em $0,003 \text{ Hz}^2$, nove pontos de medição classificariam o evento como uma perda de carga.

Figura 5.12 – (a) Frequências e (b) detalhes do instante inicial do Evento 04.

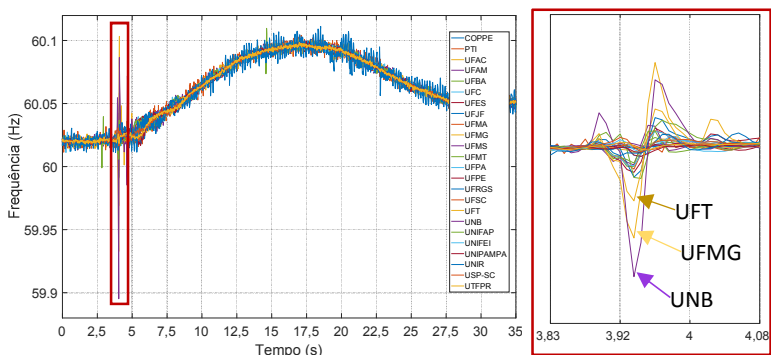
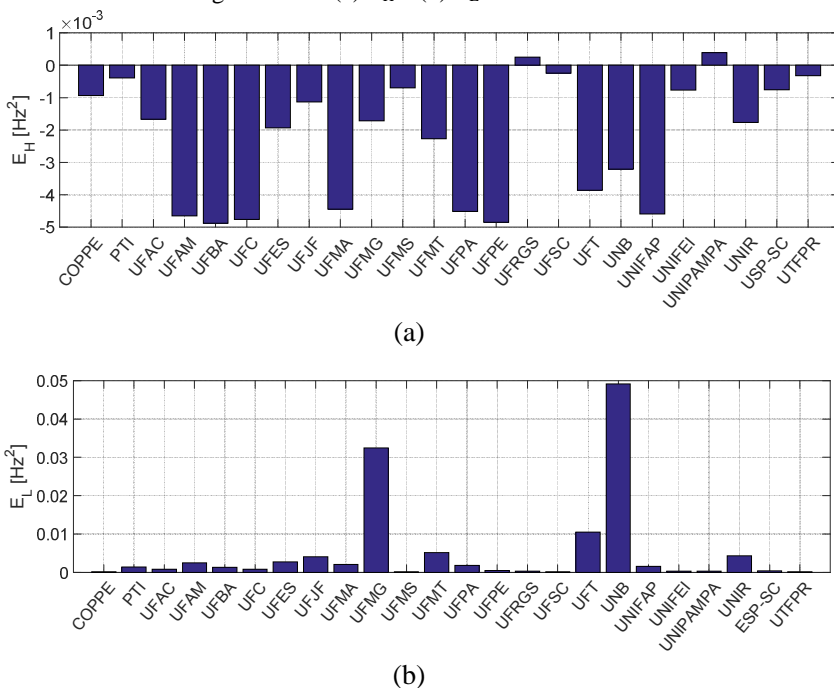
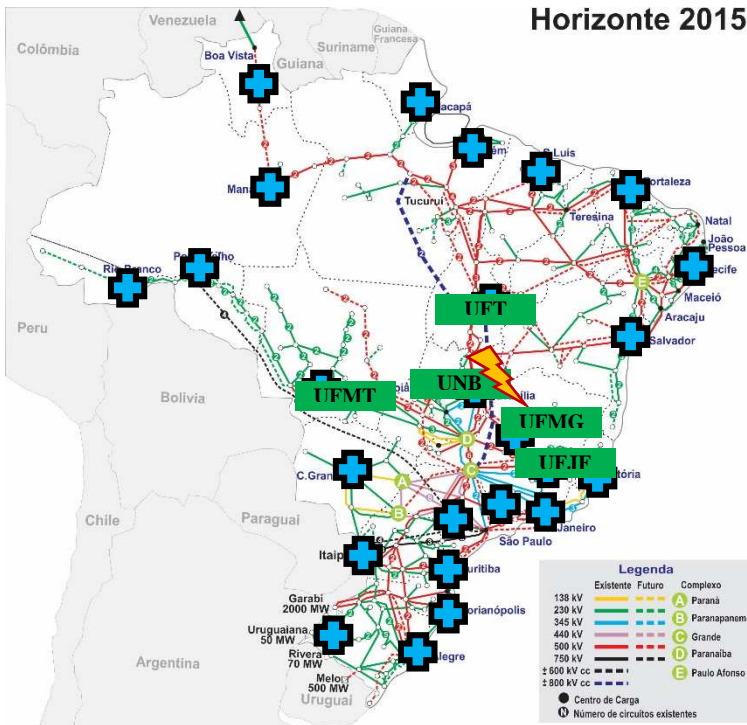


Figura 5.13 – (a) E_H e (b) E_L do Evento 04.



Observa-se na Figura 5.13 (b), que a EWM aponta como as PMUs mais próximas ao evento a UNB, UFMG e UFT respectivamente. A localização aproximada do evento é apresentada na Figura 5.14.

Figura 5.14 – Localização do Evento 04.

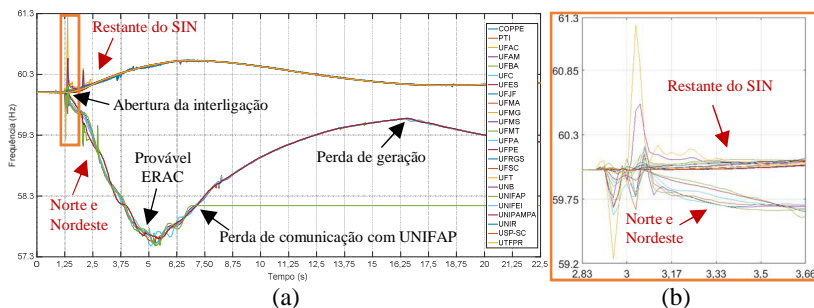
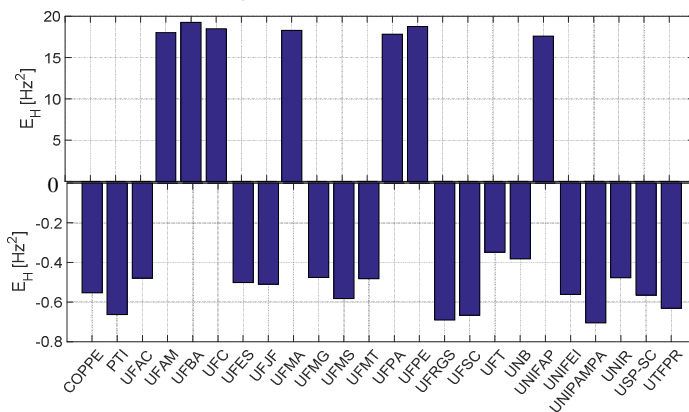


• Caso C

Na Figura 5.15 são apresentados a (a) excursão e o (b) detalhe do instante inicial das frequências ao longo do **Evento 05**. O evento se caracteriza pela abertura da interligação Norte e Nordeste com o restante do SIN. Houve a atuação do ERAC e o desligamento de usinas geradoras.

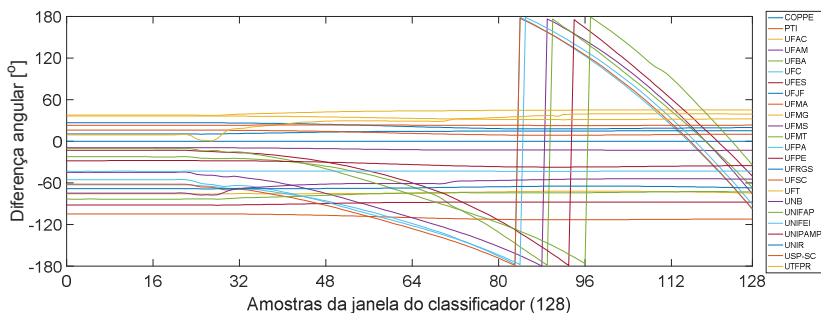
Na Figura 5.16 são apresentadas as E_H calculadas em todos os pontos de medição do SIN. Nota-se que as energias correspondentes a todas as PMUs ilhadas (UFAC, UFAM, UFC, UFPA, UFPE e UNIFAP) são positivas e com magnitude muito superior as do restante do sistema, que possuem energias negativas.

Figura 5.15 – (a) Frequências e (b) detalhes do instante inicial do Evento 05.

Figura 5.16 – E_H do Evento 05.

Neste caso, sete pontos de medição indicaram perda de geração e dezessete indicaram perda de carga. Entretanto o diagnóstico final do evento foi apontado como um ilhamento, pois, houve a ultrapassagem por $\pm 180^\circ$ na diferença angular registradas pelas sete PMUs ilhadas, conforme ilustrado na Figura 5.17.

Figura 5.17 – Diferenças angulares do Evento 05.



5.1.3. Estudo 3 – Estimação da magnitude de eventos

Este estudo tem por objetivo analisar as equações de reta de tendência criadas para ambas as metodologias. Para isso, aborda-se o cálculo da taxa de variação da frequência média do sistema e da energia dos coeficientes dos maiores níveis da TWD (E_H), removendo do cálculo sinais com saltos ou grandes oscilações por meio da energia E_L , calculada durante o processo de classificação de eventos.

• Caso A

Na Figura 5.18 é apresentada a frequência do evento, utilizada na etapa de classificação de eventos, ao longo do **Evento 06**. Os sinais de frequência próximos ao local do evento apresentaram grandes oscilações. As cinco PMUs com menor energia E_L (COPPE, UFMS, UFRGS, UFSC e UTFPR) estão destacadas na Figura 5.18 com traços mais espessos.

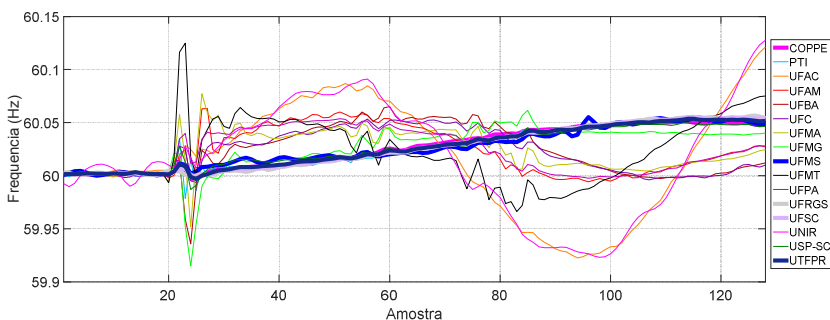
Apesar da baixa magnitude, o impacto na frequência do sistema foi muito grande, passando a casa dos 60,1 Hz, provavelmente por ser um horário de carga leve. A taxa de variação da frequência média do centro de inércia (df_c/dt), considerando apenas as cinco PMUs com menor E_L foi de 28,09 mHz/s. Ao utilizar o sinal de todas as PMUs, a df_c/dt cai para 23,80 mHz/s. Ambas se encaixam na equação para eventos maiores do que 500 MW.

A energia dos coeficientes mais elevados da TWD para o centro de inércia (E_{Hc}), utilizando as cinco PMUs com menor E_L , foi de 46,6948 mHz². Ao utilizar o sinal de todas as PMUs a E_{Hc} passa a ser

35,9 mHz². Ambas se encaixam na equação para eventos maiores do que 500 MW.

Por ser um evento de pequeno porte, mas com uma grande excursão na frequência, a estimativa da magnitude para este evento foi prejudicada, uma vez que nas Figuras 4.21 e 4.24, o evento se encontra longe das retas de tendência, evidenciando a necessidade da separação dos eventos no registro histórico de acordo com o patamar de carga no instante da ocorrência do evento.

Figura 5.18 – Frequências do Evento 06 na janela do classificador.



• Caso B

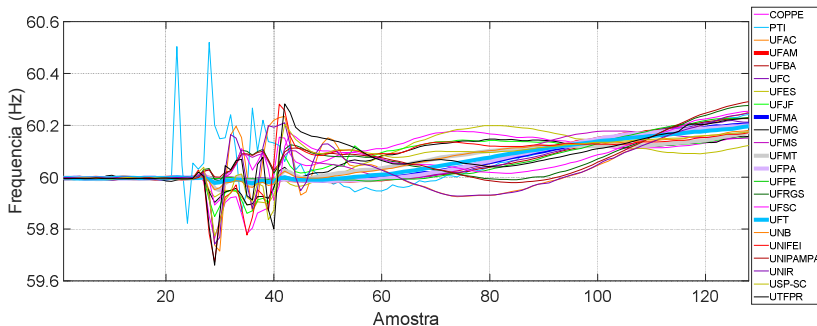
Na Figura 5.19 é apresentada a excursão da frequência ao longo do **Evento 07** na janela utilizada pela etapa de classificação de eventos. As cinco PMUs com menor energia E_L (UFAM, UFMA, UFMT, UFPA e UFT) estão destacadas na Figura 5.19 com traços mais espessos.

A taxa de variação da frequência média do sistema, considerando apenas as cinco PMUs com menor E_L foi de 104,054 mHz/s e, ao utilizar o sinal de todas as PMUs, a df_c/dt se altera para 108,3 mHz/s. A energia E_{Hc} média utilizando as cinco PMUs com menor E_L foi de 669,138 mHz². Ao utilizar o sinal de todas as PMUs este valor passa a ser 690,100 mHz².

Utilizando as Equações 4.24 e 4.26, para eventos maiores do que 500 MW, a magnitude estimada do evento utilizando a metodologia pela taxa de variação da frequência foi de 3029,62 MW, um erro de 5,32 % em relação ao valor reportado pelo ONS. Utilizando a metodologia pela

TWD, a magnitude estimada do evento foi de 3089,28 MW, um erro de 3,47 % em relação ao valor reportado.

Figura 5.19 – Frequências do Evento 07 na janela do classificador.



5.1.4. Comentários Referentes à Análise Off-Line

Realizou-se a análise de diversos eventos ocorridos no SIN e registrados pelo SMSF MedFasee BT nos anos de 2016 e 2017. De acordo com os resultados obtidos a TWD se mostrou ser uma excelente técnica de processamento de sinais para a análise de eventos em sinais elétricos.

Das análises realizadas, definiram-se empiricamente parâmetros a serem configurados no aplicativo desenvolvido no âmbito da análise em tempo real. A seguir segue uma lista dos parâmetros configurados.

- Detecção de eventos

Utilizaram-se três (3) níveis de decomposição wavelet, deste modo a janela deslizante em tempo real contém apenas 8 fasores. O *Threshold* para detecção de eventos por meio da EWN foi configurado em 5 p.u.

O tempo entre o primeiro e o segundo terminal para se confirmar um evento foi considerado como 300 ms. Após confirmado, o tempo de duração do evento é de um segundo, contados a partir do instante da primeira detecção.

• Classificação de eventos

O *threshold* de salto para a classificação por meio da E_H fixado 0,005 Hz². Os parâmetros para o diagnóstico final no SMSF MedFasee BT foram definidos como:

- **ilhamento**: se houver qualquer PMU em ilhamento;
- **perda de geração**: se houver seis (6) ou mais PMUs localizadas em regiões cujo sinal indicou perda de geração e um número menor do que três (3) indicarem perda de carga;
- **perda de carga**: se houver seis (6) ou mais PMUs localizadas em regiões cujo sinal indicou perda de carga e um número menor do que três (3) indicarem perda de geração;
- **salto**: se qualquer umas das opções anteriores não forem atendidas.

• Localização de eventos

A PMU cujo sinal registrado contém a maior EWM no instante de detecção do evento será considerada como sendo a PMU mais próxima do local da ocorrência do evento. A segunda e terceira maiores EWM também serão reportadas.

• Estimação da magnitude de eventos

Apesar de necessitar de um número maior de eventos no registro histórico, definiram-se 4 equações a serem utilizadas no aplicativo desenvolvido em tempo real.

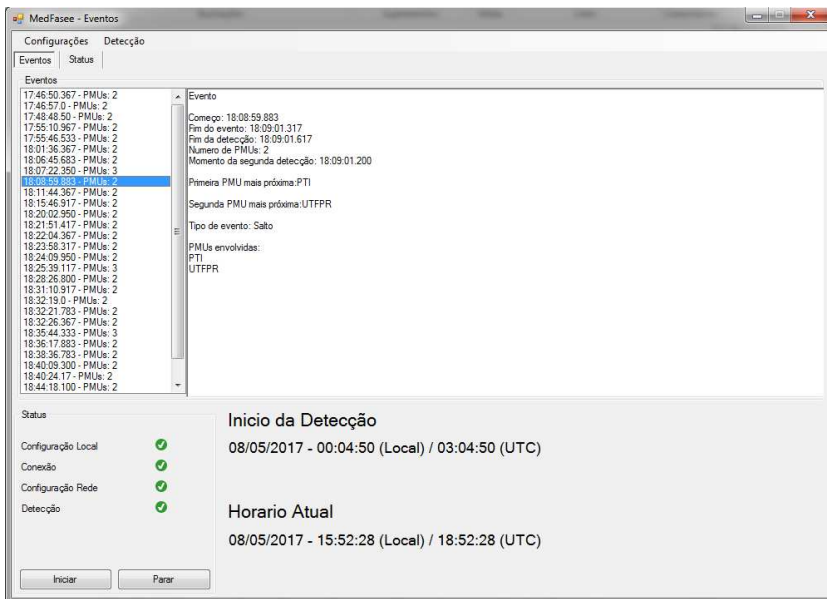
- Equação 4.23: se a df_c/dt for menor do que 20 mHz/s;
- Equação 4.24: se a df_c/dt for maior do que 20 mHz/s;
- Equação 4.25: se a E_{Hc} for menor do que 20 mHz²;
- Equação 4.26: se a E_{Hc} for maior do que 20 mHz²;

5.2. AMBIENTE DE MONITORAMENTO EM TEMPO REAL

Após validadas as metodologias e definidos os parâmetros a serem utilizados no âmbito da análise em tempo real, as metodologias foram implementadas em um aplicativo desenvolvido em linguagem C#, por intermédio da plataforma *Visual Studio*.

O aplicativo desenvolvido possui uma interface homem-máquina (IHM), apresentada na Figura 5.20. Na parte superior há dois menus utilizados para a parametrização. No menu “configurações”, configura-se a conexão com o sinal *Multicast* do SMSF MedFasee BT. Ainda neste menu, deve ser selecionado um arquivo contendo as informações referentes aos terminais (PMUs) do sistema, selecionar a pasta onde serão armazenados os eventos analisados e, caso desejado, configurar uma lista de e-mails para o envio automático de alertas.

Figura 5.20 – IHM principal do aplicativo computacional.



No menu “Detecção”, são configurados os parâmetros referentes à etapa de detecção do algoritmo. Tais parâmetros se referem: ao limiar de detecção, ao número mínimo de terminais para se confirmar um evento, ao nível de decomposição wavelet utilizado na etapa de detecção

e ao tamanho da janela utilizada para se normalizar a energia dos coeficientes wavelet, conforme descrito na Seção 4.2.

Logo abaixo há duas opções, “Eventos” e “Status”, respectivamente. Em “Eventos”, apresenta-se no canto esquerdo, a lista dos eventos detectados. Ao selecionar um evento, o relatório do evento é apresentado na parte central, conforme a Figura 4.20. O relatório de cada evento é armazenado separadamente em um arquivo no formato “txt”, na pasta selecionada previamente contendo informações referentes:

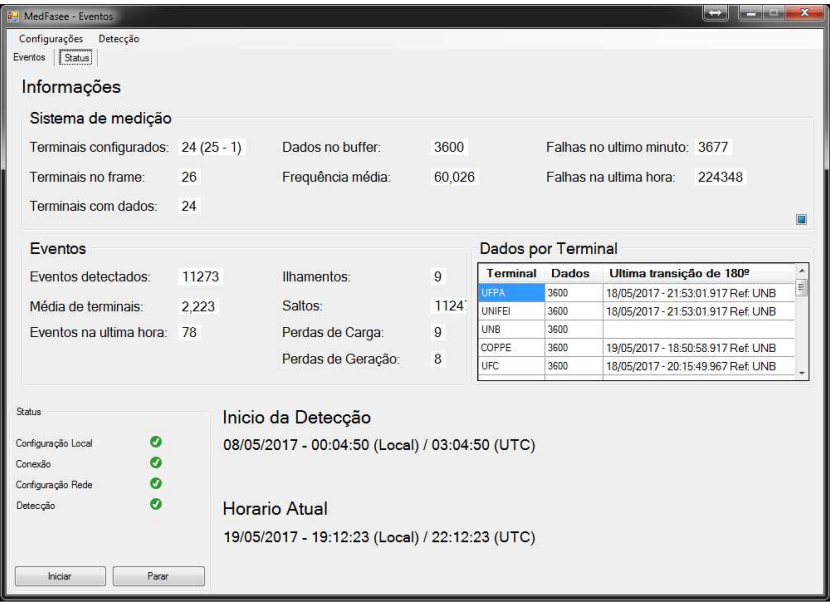
- ao instante de detecção;
- a quantidade e quais as PMUs, cujas grandezas elétricas medidas foram sensibilizadas pelo evento;
- ao tipo de evento;
- a sua magnitude em MW e;
- o valor máximo e mínimo da excursão da frequência durante o evento.

Na Figura 5.21, é apresentada a seção “Status” do aplicativo. Nesta seção, são apresentadas informações referentes:

- ao sistema de medição;
 - quantidade de PMUs configuradas;
 - quantidade de PMUs na rede *multicast*;
 - quantidade de PMUs online;
 - quantidade de dados no buffer do aplicativo;
 - frequência média e;
 - quantidade de dados com falhas no último minuto e hora.
- aos eventos detectados e;
- a conexão.

No campo dos Eventos, é apresentada uma estatística referente aos eventos detectados. No campo “Dados por Terminal”, apresenta-se o último instante que a diferença angular de cada terminal, passou pela transição entre $\pm 180^\circ$.

Figura 5.21 – Seção *Status* do aplicativo.



A seguir são apresentados uma sequência de eventos detectados e analisados automaticamente por meio da aplicação no SMSF MedFasee BT fazendo o monitoramento do SIN. Na Tabela 5.2 são apresentadas as descrições referentes à data, hora, localização e tipo dos eventos. Nenhum evento do tipo perda de geração foi reportado no IPDO/ONS durante o período monitorado.

Tabela 5.2 – Eventos detectados em tempo real

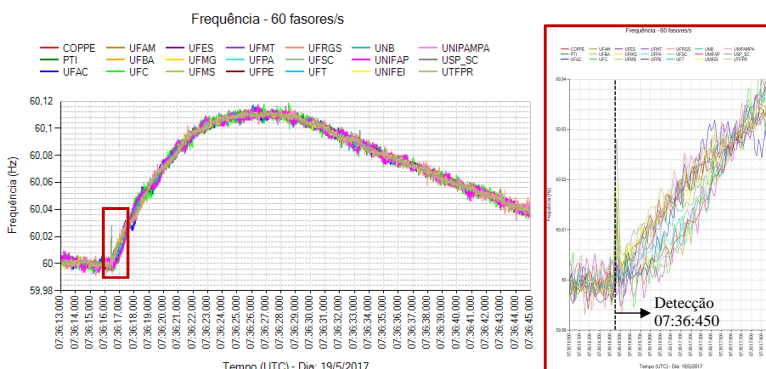
Nº	Data	Horário (UTC)	Tipo	Mag. (MW)	Local	Observações
01	19/05/17	07:36:16,4	PC	415	SP	Desligamento da transformação 440/88 kV e de duas barras na região oeste de SP.
02	14/02/17	03:49:09,4	PC	-	DF	Não reportado no IPDO/ONS
03	12/02/17	10:51:32,2	PG	-	CE	Não reportado no IPDO/ONS
04	27/02/17	18:18:36,1	Salto	-	AC	Não reportado no IPDO/ONS
05	17/02/17	15:29:54,5	Ilha	-	MT	Desligamento LT 500kV e várias LTs 230kV em MT. MT, AC e RO permaneceram interligados e isolados do restante do SIN.

06	14/03/17	04:34:00 04:34:07 04:34:50	PG PC PG	-	ES	Não reportado no IPDO/ONS
----	----------	----------------------------------	----------------	---	----	---------------------------

5.2.1. Evento 01: 19/05/2017 – Perda de carga

No dia 14/02/2017 às 07h36min16,450s ocorreu um evento no SIN detectado no instante exato da ocorrência do evento e classificado como perda de carga. Na Figura 5.22 são apresentadas a (a) excursão e (b) o detalhe das frequências no instante inicial.

Figura 5.22 – (a) Frequência e (b) detalhe do instante inicial do Evento 01.



O sinal da USP_SC foi o primeiro sinal a ser sensibilizado pelo evento. O aplicativo indicou a ocorrência do evento em quatro pontos de medição (USP_SC, UNIFEI, UTFPR e UFMS) do SIN. A PMU USP_SC, localizada na cidade de São Carlos/SP, foi considerada a mais próxima do evento.

A magnitude estimada pelo aplicativo foi de 512,30 MW pelo método da taxa de variação da frequência e de 676,91 MW pelo método da energia dos coeficientes de detalhe da TWD. O valor reportado pelo ONS foi de 415 MW. Esta discrepância na estimativa da magnitude do evento é explicada pela necessidade de se separar os eventos do registro histórico de acordo com o patamar de carga de cada evento.

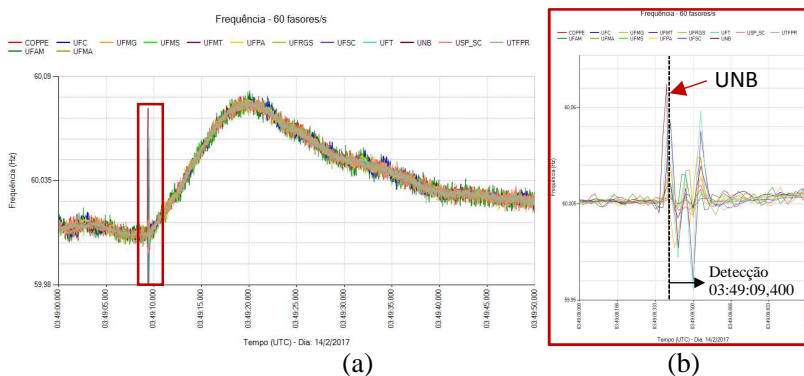
O Evento 01 ocorreu às sete horas (UTC), o que corresponde a um patamar de carga leve para o SIN, tornando a frequência sensível às variações de carga/geração. Deste modo, para ambos os métodos, a taxa de variação da frequência e a energia dos coeficientes wavelets se comportaram com valores para eventos grandes, conforme as Equações

4.24 e 4.26. Assim, ao utilizarmos as equações para eventos pequenos (Equações 4.23 e 4.25), a estimativa ficaria em 423,92 MW pelo método da taxa de variação da frequência e de 506,47 MW pelo método da energia dos coeficientes wavelets.

5.2.2. Evento 02: 14/02/2017 – Perda de carga

No dia 14/02/2017 às 03h49min09,366s ocorreu um evento no SIN detectado às 03h49min09,400s e classificado como perda de carga. Na Figura 5.23 são apresentadas a (a) excursão e (b) o detalhe das frequências no instante inicial. O sinal da UNB foi o primeiro sinal a ser sensibilizado pelo evento e ficou indisponível imediatamente.

Figura 5.23 – (a) Frequência e (b) detalhe do instante inicial do Evento 02.



O aplicativo indicou a ocorrência do evento em dez pontos de medição (UFPA, UNB, UFC, UNIR, UFMT, UFMG, UFT, UFMA, UFBA e UFES) do SIN. A PMU UNB, localizada na cidade de Brasília/DF, foi considerada a mais próxima do evento.

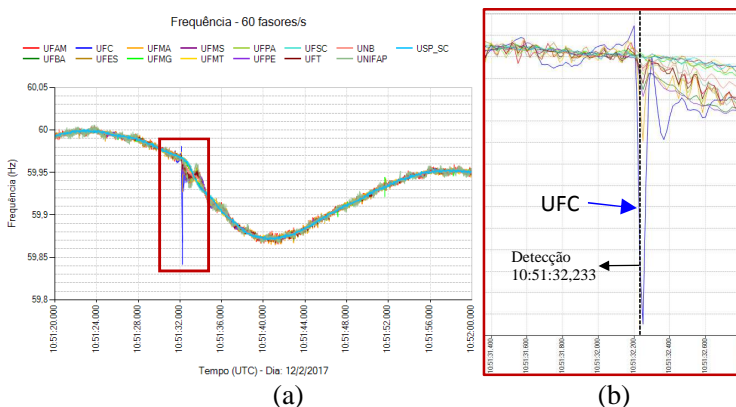
A magnitude estimada pelo aplicativo foi de 143,05 MW pelo método da taxa de variação da frequência e de 133,01 MW pelo método da energia dos coeficientes de detalhe da TWD.

5.2.3. Evento 03: 12/02/2017 – Perda de geração

No dia 12/02/2017 às 10h51min32,200s ocorreu um evento no SIN detectado às 10h51min32,233s e classificado como perda de geração. Na Figura 5.23 são apresentadas a (a) excursão e (b) o detalhe

das frequências no instante inicial. O salto no instante inicial, em azul, corresponde ao sinal na PMU UFT. O aplicativo indicou a ocorrência do evento em quatro pontos de medição (UFC, UFPE, UFMA e UFBA) do SIN, sendo a PMU UFC, localizada na cidade de Fortaleza/CE, indicada como a mais próxima do evento. O evento foi classificado como uma perda de geração.

Figura 5.24 – Frequência ao longo do Evento 03.



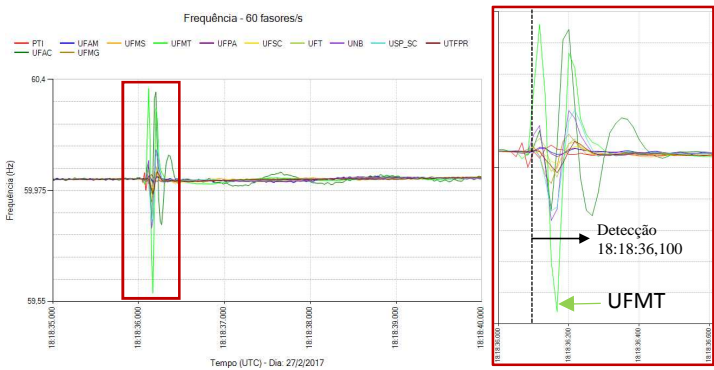
A magnitude estimada pelo aplicativo foi de 352,87 MW pelo método da taxa de variação da frequência e de 393,95 MW pelo método da energia dos coeficientes de detalhe da TWD.

5.2.4. Evento 04: 27/02/2017 – Salto

No dia 27/02/2017 às 18h18min36,100s ocorreu um evento no SIN detectado às 18h18min36,100s e classificado como salto. As frequências registradas apresentaram saltos e, em seguida, os sinais da UFAC e UNIR apresentaram uma pequena oscilação. Na Figura 5.25 são apresentadas a (a) excursão e (b) o detalhe das frequências no instante inicial. O maior salto registrado corresponde ao sinal da PMU UFMT.

O aplicativo indicou a ocorrência do evento em dezoito pontos de medição (UFPA, UNIFEI, UNB, COPPE, UFC, USP_SC, UTFPR, UFSC, UNIR, UFMT, UFMG, UFMS, UFPE, UFT, UFBA, UFAC, PTI e UFES) do SIN, sendo a PMU UFMT indicada com a mais próxima do evento, localizada na cidade de Cuiabá/MT.

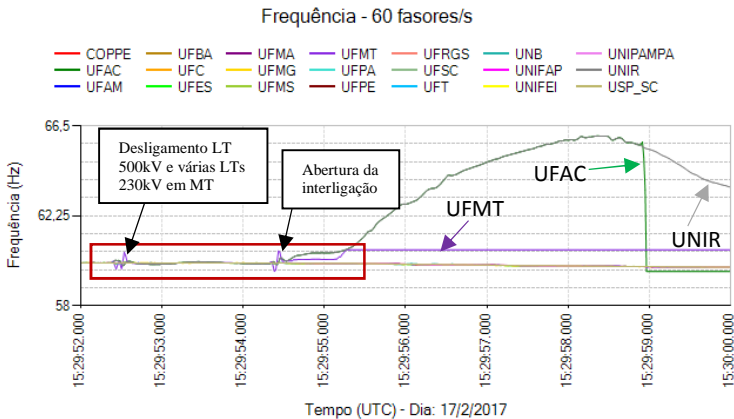
Figura 5.25 – Frequência ao longo do Evento 04.



5.2.5. Evento 05: 17/02/2017 – Ilhamento AC, RO e MT

No dia 17/02/2017, às 15h29min54,467s ocorreu um evento no SIN desconectando os estados de Mato Grosso, Acre e Rondônia do restante do SIN. Ainda, houve uma perda de 648 MW de geração em MT e a interrupção de 589 MW de cargas, sendo 417 MW no interior de MT, 157 no sul de RO e 15 MW no sul do estado do Pará (ONS, 2016a). Na Figura 5.26 são apresentadas as frequências ao longo do evento.

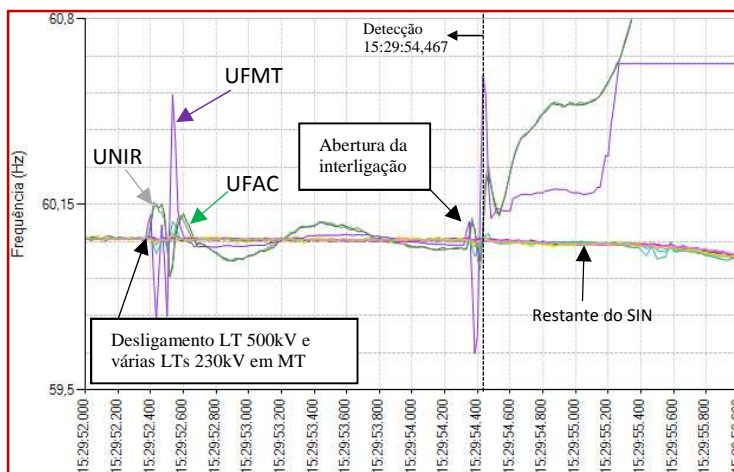
Figura 5.26 – Frequência ao longo do Evento 04.



Os detalhes do instante inicial do evento, destacado em azul, são apresentados na Figura 5.27. Nota-se que a abertura da interligação

ocorreu dois segundos após um evento anterior, o qual apresenta saltos no sinal da PMU UFMT (em roxo). A PMU UFMT perdeu comunicação com o SMSF MedFasee BT aproximadamente um segundo após a abertura da interligação e, pouco menos de cinco segundos, a PMU UFAC perdeu comunicação.

Figura 5.27 – Detalhe da frequência no instante inicial do Evento 05.

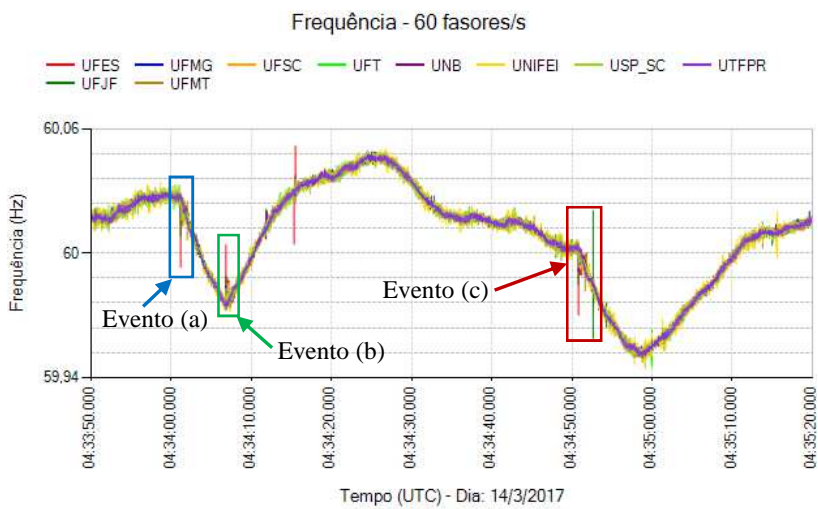


O aplicativo indicou a ocorrência do evento em seis pontos de medição (UNB, UNIR, UFMT, UFT, UFAC e PTI) do SIN, sendo a PMU UFMT, localizada na cidade de Cuiabá/MT, indicada com a mais próxima do evento. O evento foi classificado como um ilhamento.

5.2.6. Evento 06: 14/03/2017 – 3 eventos em sequência

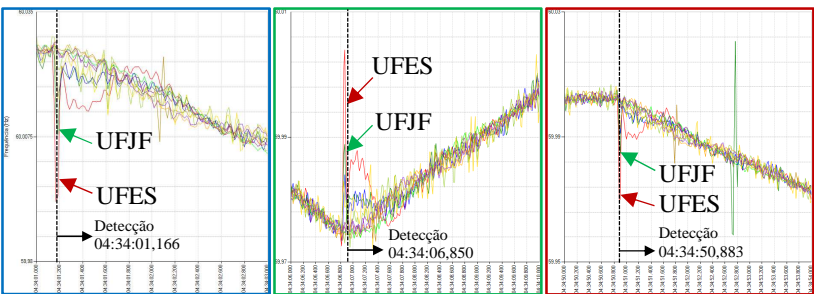
No dia 14/03/2017 foram detectados três eventos em sequência, sendo o (a) primeiro uma perda de geração, por volta das 04h34min00seg, o (b) segundo uma perda de carga, por volta das 04h34min07seg e o (c) terceiro uma perda de geração às 04h34min50seg. Na Figura 5.28, são apresentadas as frequências registradas ao longo dos eventos, cujos instantes de ocorrência estão destacados.

Figura 5.28 – Frequência ao longo do Evento 06.



Na Figura 5.29 são apresentados os detalhes dos instantes iniciais da ocorrência de cada evento. Cada evento é representado por sua cor de destaque na Figura 5.28. Nota-se que nos três eventos a PMU UFES apresenta um grande salto no instante inicial.

Figura 5.29 – Detalhes das frequências nos 3 eventos do Evento 06.



Para o primeiro evento, o aplicativo indicou a ocorrência do evento em quatro pontos de medição (UFT, UFES, UFJF e UFMT) do SIN. O evento foi classificado como uma perda de geração com magnitude de 352,87 MW pelo método da taxa de variação da frequência e de 393,95 MW pelo método da energia dos coeficientes de detalhe da TWD.

No segundo evento, o aplicativo indicou a ocorrência do evento em dois pontos de medição (UFES e UFJF) do SIN. O evento foi classificado como uma perda de carga com magnitude de 128,23 MW pelo método da taxa de variação da frequência, e de 122,82 MW pelo método da energia dos coeficientes de detalhe da TWD.

Por fim, no terceiro evento, o aplicativo indicou a ocorrência do evento em três pontos de medição (UFES, UFJF e UFMT) do SIN. O evento foi classificado como uma perda de geração com magnitude de 167,08 MW pelo método da taxa de variação da frequência e de 122,82 MW pelo método da energia dos coeficientes de detalhe da TWD. Nos três eventos, a PMU UFES na cidade de Vitória/ES foi indicada como a mais próxima ao evento. Ainda, a PMU UFJF na cidade de Juiz de Fora/MG foi indicada como a segunda mais próxima ao evento. Assim, evidencia-se que os três eventos ocorreram, provavelmente, em uma mesma região entre Vitória/ES e Juiz de Fora/MG.

5.3. PERFORMANCE

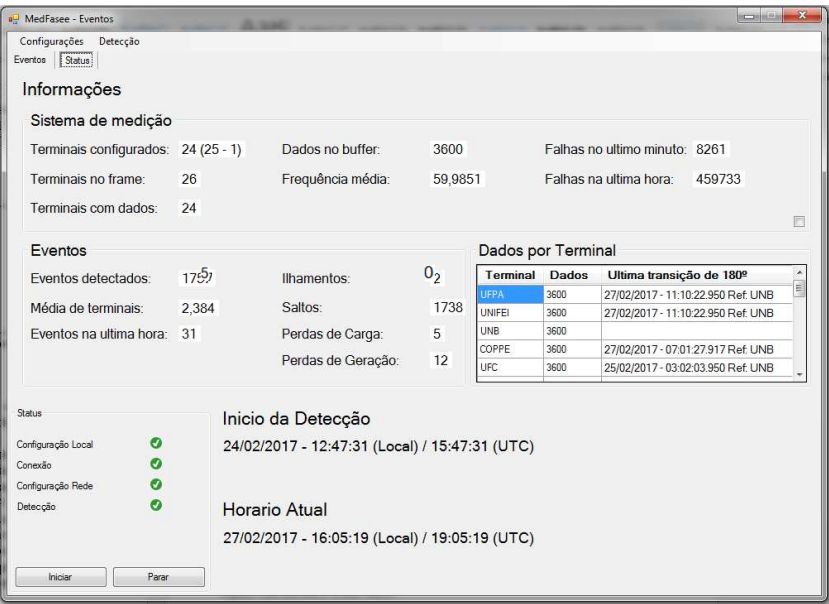
Para analisar a *performance*, o aplicativo desenvolvido ficou em operação entre os dias 24/02/2017 às 15h47min31seg até o dia 27/02/2017 às 16h05min19seg. Na Figura 5.30, é apresentado o status do aplicativo durante este período de operação.

Durante estes 3 dias de operação foram detectados 1755 eventos no SIN. Entretanto, a grande maioria destes eventos (99,03%) envolveram apenas duas PMUs, o que, geralmente, corresponde a pequenos eventos locais que não interferem no balanço de potência do sistema, sendo classificados como salto.

Foram detectados 12 eventos do tipo perda de carga e 5 do tipo perda de geração. Todos os eventos envolvendo perda de carga foram de pequeno porte, sendo a potência média estimada em 170,42 MW. Já para os eventos do tipo perda de geração, alguns apresentaram grandes valores, sendo a média de potência dos eventos igual a 508,76 MW, cujo menor evento foi de 83,1549 MW e o maior de 1790,512 MW.

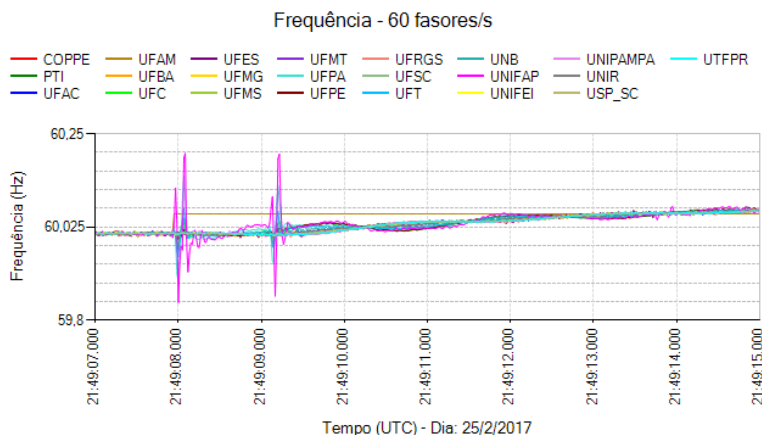
O único evento reportado no IPDO/ONS, durante este período, foi no dia 25/02/2017, o qual às 21h49min07,933s causou o desligamento automático das linhas de transmissão em 500 kV Jurupari/Oriximiná circuitos 1 e 2 (Macapá TRA), desconectando o sistema de Manaus do restante do SIN. Em consequência, houve a interrupção de 345 MW de cargas da Eletrobrás Distribuição Amazonas, na região metropolitana de Manaus, capital do estado do Amazonas (ONS, 2016a).

Figura 5.30 – Status do aplicativo após 3 dias de operação.



A frequência registrada ao longo deste evento é apresentada na Figura 5.31. O aplicativo indicou a ocorrência deste evento em 7 pontos de medição (UFPA, UNB, UFC, UFPE, UFT, UFBA e UNIFAP) do SIN, sendo a PMU UNIFAP indicada com a mais próxima do evento, localizada na cidade de Macapá/AP. Nota-se que a PMU UFAM perdeu comunicação com o SMSF MedFasee BT, desta forma não foi possível observar a ocorrência do ilhamento no estado do Amazonas. O evento foi classificado como uma perda de 227,03 MW de carga, representando um erro relativo de 34,19% do valor reportado pelo ONS.

Figura 5.31 – Frequência em um evento com ilhamento no dia 25/02/2017.



5.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, as metodologias desenvolvidas para a análise automática de eventos foram validadas por meio da análise *off-line* de eventos registrados pelo SMSF MedFasee BT. Tais análises foram realizadas em conjunto com os desenvolvimentos no sentido de se definir a parametrização dos algoritmos para a aplicação em tempo real.

Assim, definiu-se que, para o SMSF MedFasee BT, só é considerado um evento quando um número igual ou maior a dois pontos de medição detectam a presença de um evento, no sinal da frequência, em um intervalo inferior a 300 milissegundos e, ainda, os pontos de medição que detectarem eventos em até 1 segundo após a primeira detecção, são consideradas participantes de um mesmo evento.

Verificou-se na etapa de detecção, que a utilização de 3 níveis de decomposição para o cálculo da EWN é suficiente para se fazer a detecção de eventos com ou sem a presença de saltos no instante inicial. Ainda nesta etapa, definiu-se 5 p.u. como *threshold* para detecção de eventos na EWN para o sinal da frequência.

Na etapa de classificação, o *threshold* da E_H para indicação de salto ou evento sistêmico foi avaliado. Com este limiar definido em $0,005 \text{ Hz}^2$, eventos com perdas de blocos de carga ou geração superiores a 200 MW e os eventos do tipo salto são classificados corretamente. Com este limiar com valores inferiores, a ocorrência de saltos em instantes em que a excursão natural da frequência é acentuada, podem ser classificados erroneamente como perdas de carga ou geração.

Ressalta-se que as configurações utilizadas para concluir o diagnóstico do tipo de evento foram estabelecidas considerando-se o SMSF MedFasee BT. Esta etapa da metodologia deve ser configurada especificamente para cada SMSF aplicado.

Em relação à etapa de localização, ambas as metodologias desenvolvidas apresentam resultados satisfatórios ao determinar a PMU mais próxima da ocorrência do evento, entretanto, a metodologia que utiliza a EWM, calculada na etapa de classificação, apresentou melhores resultados para se determinar a segunda e a terceira PMU mais próxima do evento.

As estimativas da magnitude do evento apresentaram resultados plausíveis. Tais resultados demonstram que as metodologias são válidas, entretanto, o registro histórico de eventos precisa ser alimentado com um grande número de novos eventos, cuja real magnitude seja reportada pelo ONS. Ainda assim, o resultado apresentado em tempo real pode auxiliar a informar os usuários se o evento é de pequeno ou grande porte.

Em relação ao cálculo da taxa de variação média da frequência no SIN após a ocorrência de um evento, a energia dos coeficientes da TWD, calculadas nos primeiros níveis de decomposição na etapa de classificação, remove os sinais com grandes saltos e/ou grandes oscilações do cálculo, introduzindo assim, maior confiabilidade a estimação da magnitude do evento.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho, desenvolveram-se metodologias para a análise automática de eventos em SEE utilizando sincrofasores e a TWD como técnica de processamento dos sinais elétricos. As metodologias desenvolvidas foram aplicadas e validadas em dados de sincrofasores do SMSF MedFasee BT em ambiente *off-line* e posteriormente ao monitoramento do SIN em tempo real. O aplicativo desenvolvido para aplicação em tempo real utiliza 1,8 segundos de dados após a ocorrência do evento.

No capítulo 2, discutiu-se brevemente a utilização de sincrofasores no sistema elétrico brasileiro. Neste sentido, comentou-se sobre a organização do setor bem como os aspectos estruturais e operacionais do SIN, evidenciando-se a necessidade da inserção de novas tecnologias de monitoramento para o SIN. Assim, apresentou-se as principais características relativas aos SMSF, descreveu-se sobre o Projeto MedFasee/UFSC e o SMSF MedFasee BT, cujo sistema foi utilizado ao longo do desenvolvimento e validação das metodologias desenvolvidas no presente trabalho. Por fim, apresentou-se uma breve descrição do projeto de um SMSF para o SIN. Verificou-se que o tema do presente trabalho é atual e está incluído nas especificações do ONS para o SMSF-SIN.

No capítulo 3, descreveram-se os principais tipos de eventos que ocorrem em SEE, apresentando por meio de gráficos o comportamento da dinâmica das grandezas elétricas registrados pelo SMSF MedFasee BT. Por fim, uma síntese dos eventos foi realizada destacando a frequência como principal grandeza elétrica para se fazer a análise automática de eventos no monitoramento de SMSF em baixa tensão. No entanto, para verificação de ilhamentos, a diferença angular da tensão de sequência positiva foi utilizada, pois a característica do escorregamento contínuo do ângulo durante um ilhamento apresenta resultados confiáveis.

O capítulo 4 destinou-se à descrição propriamente dita dos desenvolvimentos. Dentre os desenvolvimentos estão: a detecção; a classificação; a localização; e a estimação da magnitude de eventos.

Para tais aplicações, explorou-se a utilização da TWD como instrumento de análise. A característica de recursividade da TWD fornece informações que podem ser utilizadas em todas as etapas da análise de eventos, uma vez que é possível separar as componentes de frequência do sinal sem perder sua informação temporal, e ainda, extraindo características da dinâmica do sinal.

O capítulo 5 foi destinado à apresentação dos resultados obtidos com a aplicação das metodologias. Inicialmente apresentaram-se resultados de alguns testes aplicados em ambiente *off-line* a fim de validação das metodologias e definição dos parâmetros a serem utilizados na aplicação em tempo real aplicadas ao SMSF MedFasee BT. Em sequência, apresentou-se a análise de alguns resultados obtidos em tempo real.

No processo de detecção de eventos utilizou-se uma janela deslizante contendo apenas oito fasores atualizados em tempo real para o cálculo da EWM em três níveis de decomposição. Esta energia é normalizada (EWN), utilizando uma janela de um minuto, retirando assim, características tanto estacionárias quanto da dinâmica do sinal. Verificou-se que esta configuração é adequada para se realizar a detecção de eventos com características abruptas quanto com características dinâmica lenta, como perdas de carga ou geração, com ou sem a presença de saltos no instante inicial.

O processo de classificação de eventos utiliza 20 fasores pré-evento e 108 fasores pós-evento, o que corresponde em 1,8 segundos de dados após o início do evento. Este processo foi dividido em duas etapas. Na primeira é realizada uma classificação individual por região (no caso do SMSF MedFasee BT, por PMU) e então, baseado na quantidade de eventos classificados em cada região, a segunda etapa faz o diagnóstico final do tipo do evento presenciado no SIN. Ressalta-se que as parametrizações utilizadas para concluir o diagnóstico do tipo de evento foram estabelecidas considerando-se o SMSF MedFasee BT. Esta etapa da metodologia deve ser configurada especificamente para cada SMSF aplicado. Com o *Thr_Cla* ajustado em $0,005 \text{ Hz}^2$ a metodologia se mostrou capaz de classificar corretamente os eventos do tipo salto, ilhamento e perda de carga ou geração, quando a magnitude é maior ou igual a 200 MW.

Para o processo de localização de eventos, a localização geográfica do ponto exato da ocorrência do evento não foi explorada no presente trabalho, mas sim, a detecção da PMU mais próxima ao evento. Foram utilizadas duas estratégias. A estratégia utilizando a EWM calculada na etapa de detecção de eventos apresentou melhores resultados para se localizar as três PMUs mais próximas ao evento.

No processo de estimação da magnitude de eventos, utilizou-se de duas metodologias. Ambas necessitam de um registro histórico de eventos passados, contendo os fasores de frequência e a magnitude exata do evento. Na primeira, compara-se a magnitude dos eventos históricos com a taxa de variação da frequência do centro de inércia (df_c/dt) no

instante após a ocorrência do evento. Já na segunda, compara-se com a energia contida nos níveis 5 ao 7 da TWD para o centro de inércia (E_{HC}), calculados na etapa de classificação.

A grande dificuldade encontrada no desenvolvimento do presente trabalho se encontra na metodologia para a estimação da magnitude do evento. Verificou-se a necessidade de separar os eventos do registro histórico de acordo com o patamar de carga no instante da sua ocorrência. As metodologias necessitam de uma vasta gama de eventos históricos registrados, cuja magnitude seja reportada pelo ONS. Entretanto, a quantidade de eventos no registro histórico necessita ser ampliada para que curvas de tendência para cada patamar de carga possam ser criadas. Porém, no boletim denominado IPDO (Informativo Preliminar Diário da Operação) o ONS reporta eventos que resultam em perda de carga, assim nem todos os eventos identificados pelo SMSF MedFasee BT estarão reportados pelo ONS.

Com os resultados obtidos, é possível afirmar que a TWD se mostrou uma excelente ferramenta para a análise de eventos em sistemas de energia elétrica.

6.1. PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

As principais contribuições no desenvolver deste trabalho foram:

- A criação de uma base bibliográfica referente ao comportamento das grandezas elétricas, registradas pelo SMSF MedFasee BT, na ocorrência dos principais tipos de eventos que ocorrem no SIN;
- Criação de uma base bibliográfica referente à TW e a utilização da TWD em análise de sinais de SEEs;
- Desenvolvimento de metodologias utilizando a TWD para:
 - detecção de eventos em SEEs;
 - classificação de eventos;
 - localização da PMU mais próxima ao evento;
 - estimação da magnitude do evento e;
 - cálculo da taxa de variação média da frequência do sistema após eventos.

- Desenvolvimento de um algoritmo para a análise automática de eventos em tempo real para o monitoramento do SIN;

6.2. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

As principais sugestões para trabalhos futuros são:

- Na estimação da magnitude do evento:
 - Alimentar o registro de eventos históricos;
 - Gerar curvas de tendência para cada patamar de carga do SIN;
 - Explorar os estudos na estimação da inércia equivalente do sistema em tempo real, ou por patamar de carga, utilizando o sistema já simulado pelo Projeto MedFasee/UFSC. Deste modo, não será necessária a manutenção de um banco de dados e que os eventos sejam reportados pelo operador do sistema.
- Elaborar um problema de triangulação utilizando a EWM e a localização geográfica das PMUs;
- Desenvolver um algoritmo para monitorar a dinâmica de eventos em SEEs após perturbações no SIN por meio da TWD;
- Ao se trabalhar com medições na alta tensão, utilizar a resposta da tensão para auxiliar no problema de estimação da magnitude de eventos.

7. REFERÊNCIAS

- ABRADEE. **Visão Geral do Setor**. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/visao-geral-do-setor>>. Acesso em: 8 abr. 2017.
- ADDISON, P. S. **The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance**. 1st edition ed. Bristol u.a.: CRC Press, 2002.
- ANDRADE, S. R. C. **Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada: Aplicações para Melhoria da Operação de Sistemas Elétricos de Potência**. (Dissertação de Mestrado), Belo Horizonte/MG: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, jun. 2008.
- ASHTON, P. M. et al. **Inertia Estimation of the GB Power System Using Synchrophasor Measurements**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 30, n. 2, p. 701–709, mar. 2015.
- ASHTON, P. M. et al. **Application of phasor measurement units to estimate power system inertial frequency response**. 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Vancouver, BC, p. 1–5, 2013.
- AVDAKOVIĆ, S. et al. **Wavelets as a tool for power system dynamic events analysis – State-of-the-art and future applications**. Journal of Electrical Systems and Information Technology, v. 2, n. 1, p. 47–57, 2015.
- BARBOSA, A. C. B. et al. **Ondaletas: Histórico e Aplicação**. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo - IAG/USP e Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP-PTR-LTG, mai. 2008.
- BASTOS, M.N. et al. **“CTEEP Transmission System – Synchronized Phasor Measurement”**. In: PAC World Magazine. Dec. 2013.
- BIG. **Banco de Informações de Geração**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 8 abr. 2017.

BOLLEN, M. H. J. et al. **Signal Processing of Power Quality Disturbances**. IEEE Press Series on Power Engineering, Mohamed E. El-Hawary, Series Editor. Piscataway, NY, USA, 2006.

BONANOMI, P. **Phase Angle Measurements with Synchronized Clocks-Principle and Applications**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-100, n. 12, p. 5036–5043, 1981.

BRUSTOLIN, G. **Detecção e Análise de Eventos de Ilhamento Utilizando Dados Fasoriais Sincronizados e a Transformada Wavelet Discreta**. (Dissertação de Mestrado), Florianópolis/SC: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

BRUSTOLIN, G. et al. **Aplicação da Transformada Wavelet Discreta para a Detecção de Eventos no SIN Utilizando Dados Fasoriais Sincronizados**. XII SIMPÓSIO DE ESPECIALISTAS EM PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO E EXPANSÃO ELÉTRICA, 2012.

BURRUS, C. S. et al. **Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms: A Primer**. 1 edition ed. Upper Saddle River, N.J.: Pearson, 1997.

CHEN, G. et al. **Wavelet-Based Power Network Disturbance Identifying Part I: Theory and Method**. 4th National Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering, 2015a.

CHEN, G. et al. **Wavelet-Based Power Network Disturbance Identifying Part II: Application in Large Scale Power System**. 4th National Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering, 2015b.

CHUI, C. K. **Wavelets: A Mathematical Tool for Signal Analysis**. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1997.

COSTA, A. S. et al. **Planejamento da Operação de Sistemas de Energia Elétrica - Notas de Aula**. Florianópolis/SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

COSTA, F. B. et al. **Transformada wavelet discreta aplicada ao diagnóstico de distúrbios**. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), 2010.

DAUBECHIES, I. **Ten Lectures on Wavelets**. SIAM, 1992.

DECKER, I. C. **Curso de Medição Sincronizada de Fasores: Teoria e Aplicações**. Florianópolis/SC, 24 out. 2016.

DECKER, I. C. et al. **Desenvolvimento e Implementação de um Protótipo de Sistema de Medição Fasorial Sincronizada no Sistema de Transmissão de 440 kV da CTEEP**. XXI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), Florianópolis, SC, 2011a.

DECKER, I. C. et al. **Estudo e Avaliação do Desempenho de um Protótipo de Sistema de Medição Fasorial Sincronizada Instalado no Sistema de Transmissão da Eletrosul**. XX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), p. 1-10, Recife/PE, 2009.

DECKER, I. C. et al. **Estudo e Avaliação do Desempenho de um Protótipo de Sistema de Medição Fasorial Sincronizada Instalado no Sistema de Transmissão da Eletrosul**. EletroEvolução (Rio de Janeiro), v. 59, p. 16-23, 2010.

DECKER, I.C. et al. **“Experience and applications of phasor measurements to the Brazilian interconnected power system”**. European Transactions on Electrical Power, v. 21, p. 1557-1573, 2011b.

DECKER, I. C. et al. **Protótipo de Sistema de Medição Fasorial Sincronizada: Desenvolvimentos e Implementação no Sistema de Transmissão da CTEEP**. P&D: Revista Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL, v. 5, p. 35-38, 2013.

DECKER, I.C. et al. **“System wide model validation of the Brazilian Interconnected Power System”**. Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE, 2010, Minneapolis, MN. Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE, p. 1-8, 2011c.

DONG, J. **Power System Disturbance Analysis and Detection Based on Wide-Area Measurements**. (Doctoral Dissertations), Virginia:

Instituto Politécnico de Virginia e Universidade Estadual de Virginia, 2008.

DOTTA, D. et al. **“Design of Power System Controllers by Nonsmooth, Nonconvex Optimization”**. IEEE PES General Meeting, 2009, Calgary, AB. Proceedings of the PES GM 2009, p. 1-7, 2009a.

DOTTA, D. et al. **Wide-Area Measurements-Based Two-Level Control Design Considering Signal Transmission Delay**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 24, n. 1, p. 208–216, 2009b.

EPE – **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2016**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/Forms/Anuario.aspx>>. Acesso em: 8 abr. 2017.

ESMAEILIAN, A. et al. **Impact of electromechanical wave oscillations propagation on protection schemes**. Electric Power Systems Research, Special Issue: Papers from the 11th International Conference on Power Systems Transients (IPST), v. 138, p. 85–91, 2016.

FALCÃO D. M. **Integração de Tecnologias para Viabilização da Smart Grid**. Simpósio Brasileiro De Sistemas Elétricos (SBSE), 2010.

FERNÁNDEZ, R. M. DE C. **An Overview of Wavelet Transform Applications in Power Systems**. 14th Power Systems Computation Conference (PSCC), Sevilla, p. 1260–1266, 24-28 jun. 2002.

FNET. Disponível em: <<http://fnetpublic.utk.edu/>>. Acesso em: nov. 2016.

GAOUDA, A. M. et al. **Pattern recognition applications for power system disturbance classification**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 17, n. 3, p. 677–683, 2002.

GÓMEZ, J.E. et al. **A novel model validation methodology using synchrophasor measurements**. Electric Power Systems Research (Print), v. 119, p. 207-217, 2015.

HUBBARD, B. B. **The World According to Wavelets: The Story of a Mathematical Technique in the Making**, Second Edition. 2 edition ed. Wellesley, Mass: A K Peters/CRC Press, 1998.

IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems, IEEE Std C37.118.1-2011 (Revision of IEEE Std C37.118-2005), p. 1-61, 28 dez. 2011.

KIM, C. H. et al. **Wavelet transforms in power systems. I. General introduction to the wavelet transforms**. Power Engineering Journal, IEEE, v. 14, n. 2, p. 81–87, 2000.

KIM, C. H. et al. **Wavelet transforms in power systems. II. Examples of application to actual power system transients**. Power Engineering Journal, v. 15, n. 4, p. 193–202, 2001.

KIM, D. I. et al. **Wavelet-Based Event Detection Method Using PMU Data**. IEEE Transactions on Smart Grid, v. PP, n. 99, p. 1–9, 2015.

KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. New York: McGraw-Hill, 1994.

LEANDRO, R. B. et al. **Identification of the Oscillation Modes of a Large Power System Using Ambient Data**. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, v. 26, p. 441-453, 2015.

LYONS, R. G. **Understanding Digital Signal Processing**. 3 edition ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2010.

MALLAT, S. A **Wavelet Tour of Signal Processing**. Academic Press, 1999.

MALLAT, S. G. **A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation**. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, v. 11, n. 7, p. 674–693, 1989.

MARKHAM, P. **Data Mining and Machine Learning Applications of Wide-Area Measurement Data in Electric Power Systems**. Dez. 2012. (Doctoral Dissertations). The University of Tennessee, Knoxville, U.S.A.

MEYER, Y. **Wavelets and Operators**. Cambridge University Press, 1995.

MISITI, M. et al. **Wavelet Toolbox - User's Guide**. The Math Works Inc, USA, 1996.

MISSOUT, G. et al. **Dynamic Measurement of the Absolute Voltage Angle on Long Transmission Lines**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-100, n. 11, p. 4428–4434, 1981.

MISSOUT, G. et al. **Measurement of Bus Voltage Angle Between Montreal and SEPT-ILES**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-99, n. 2, p. 536–539, 1980.

MME – **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro – Agosto/2016**, Ministério de Minas e Energia, ago. 2016.

MME – **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro – Fevereiro/2017**, Ministério de Minas e Energia, fev. 2017.

MME – **Projeto RESEB-COM – Sumário Executivo das Sugestões**, Ministério de Minas e Energia – Secretaria de Energia, Departamento Nacional de Política Energética, out. 2001.

MONTICELLI, A. J. **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**. CEPEL e ELETROBRÁS: Editora Edgard Clücher Ltda, 1983.

NASPI. **PMUs and Synchrophasor Data Flows in North America**. Disponível em: https://www.naspi.org/sites/default/files/reference_documents/20.jpeg >. Acesso em: 25 mar. 2014.

NERC. **Balancing and Frequency Control - A technical Document Prepared by the NERC Resources Subcommittee**. Academic Press, 2011.

NUTHALAPATI, S. et al. **Managing the Grid: Using Synchrophasor Technology [Guest Editorial]**. IEEE Power and Energy Magazine, v. 13, n. 5, p. 10–12, 2015.

ONS. **Carga de Energia, Evolução Mensal.** Disponível em: <http://www.ons.org.br/sala_imprensa/energia/carga_propria.aspx>. Acesso em 8 abr. 2017a.

ONS. **Carta ONS – 0104/100/2017 – Reunião sobre a Implantação do Sistema de Medição Sincronizada de Fasores – SMSF do SIN.** Rio de Janeiro, 30 jan. 2017b.

ONS. **Dados Relevantes de 2015.** Disponível em: <http://www.ons.org.br/download/biblioteca_virtual/publicacoes/DADO_S_2015/html/index.html>. Acesso em 08 abr. 2017c.

ONS. **Informativo Preliminar Diário da Operação.** Disponível em: <http://www.ons.org.br/resultados_operacao/ipdo.aspx>. Acesso em: 20 nov. 2016a.

ONS. **Mapa Eletroenergético do Sistema Interligado Nacional - Horizonte 2015.** Disponível em: <http://www.ons.org.br/conheca_sistema/mapas_sin.aspx>. Acesso em: 20 nov. 2016b.

ONS. **ONS Phasor Measurement System Technical Specification – User Interface and Applications Specification.** 2014.

ONS. **Procedimentos de Rede.** Disponível em: <http://apps05.ons.org.br/procedimentorede/procedimento_rede/procedimento_rede.aspx>. Acesso em: 20 nov. 2016c.

ONS. **Projeto SMSF – Implantação do Sistema de Medição Sincronizada de Fasores do SIN.** Apresentação – Terceira reunião com os agentes, Rio de Janeiro, 15 fev. 2017d.

ONS. **Relatório Anual 2015.** Disponível em: <http://www.ons.org.br/biblioteca_virtual/publicacoes_relatorios_anuais.aspx>. Acesso em 8 abr. 2017e.

PHADKE, A. G. et al. **Synchronized Phasor Measurements and Their Applications.** Urbana, Illinois: Springer, 2008.

PHADKE, A. G. et al. **Synchronized phasor measurements-a historical overview**. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, pp. 476-479 vol.1, 2002.

PHADKE, A. G. et al. **A New Measurement Technique for Tracking Voltage Phasors, Local System Frequency, and Rate of Change of Frequency**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-102, n. 5, p. 1025–1038, 1983.

PRIOSTE, F. B. et al. **“Monitoring oscillations modes of the Brazilian Interconnected Power System using ambient data”**. PowerTech, 2011 IEEE Trondheim, 2011, Trondheim. PowerTech, 2011 IEEE Trondheim, p. 1-7, 2011.

QUINTAO, P. E. M. et al. **Detecção e Mitigação de Oscilações Mal Amortecidas no Sistema Interligado Nacional - Exploração de Medição Fasorial Sincronizada e Ferramentas de Análise Linear**. XIII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Foz do Iguaçu, 2014.

REIS, A. J. R. et al. **Aplicação da transformada wavelet discreta na previsão de carga a curto prazo via redes neurais**. Sba Controle & Automação, Campinas, v. 15, n. 1, p. 101-108, mar, 2004 .

SANTOS, M. M. **Análise da dinâmica de sistemas elétricos de potência usando dados de medição fasorial sincronizada**, 2008. (Dissertação de Mestrado), Florianópolis/SC: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina.

SILVEIRA, P. **Identificação e Localização de Faltas Utilizando Análise por Decomposição Wavelet para Relés de Linhas de Transmissão**. (Tese de Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, ago. 2001.

STRANG, G. et al. **Wavelets and Filter Banks**. 2nd edition ed. Wellesley, Mass.; Stockport: Wellesley-Cambridge Press, 1996.

TERZIJA, V. V. **Adaptive underfrequency load shedding based on the magnitude of the disturbance estimation**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 21, n. 3, p. 1260–1266, 2006.

TERZIJA, V. V. et al. **Adaptive underfrequency load shedding integrated with a frequency estimation numerical algorithm**. IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, v. 149, n. 6, p. 713–718, 2002.

THORP, J. S. et al. **Electromechanical wave propagation in large electric power systems**. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, v. 45, n. 6, p. 614–622, 1998.

TORABI, N. et al. **Wavelet Based Fault Classification for Partially Observable Power Systems**. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. p. 1–6, 2012.

VANFRETTI, K. D. **Applying Modelica and FMI Technologies for Power System Model Validation in the iTesla Project**. 2nd iTesla/Umbrella Common Workshop: Innovative Tools for Electrical System Security within Large Areas. Brussels/Belgium, 2014.

WALL, P. et al. **Estimation of generator inertia available during a disturbance**. IEEE Power and Energy Society General Meeting. p. 1–8, 2012.

WOLFRAM. **Haar Function**. Disponível em: <<http://mathworld.wolfram.com/HaarFunction.html>>. Acesso em: nov. 2016.

XIA, T. et al. **Wide-area Frequency Based Event Location Estimation**. IEEE Power Engineering Society General Meeting. p. 1–7, 2007.

ZARZOSA, M. **Análise de Eventos em Sistemas de Energia Elétrica Usando Sincrofasores**, 2016. (Dissertação de Mestrado), Florianópolis/SC: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina.

ZHANG, Y. Frequency Monitoring Network (FNET) Data Center Development and Data Analysis. (Doctoral Dissertations), 2014. Disponível em: <http://trace.tennessee.edu/utk_graddiss/3208>.

ZIMMER, V. Detecção, Identificação e Localização de Eventos Usando Sincrofasores, jul. 2013. (Dissertação de Mestrado), Florianópolis/SC: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina.

APÊNDICE A – TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA

Este apêndice tem por objetivo apresentar os conceitos básicos necessários para o entendimento do funcionamento da TWD por meio de uma análise multiresolução (AMR). Para maiores informações e um estudo mais aprofundado no assunto, recomendam-se algumas bibliografias, dentre elas: Daubechies (1992), Meyer (1995), Chui (1997), Strang e Nguyen (1996), Burrus et al. (1997), Addison (2002) e Hubbard (1998), além de inúmeras publicações que podem ser encontradas na literatura.

A.1. INTRODUÇÃO A TRANSFORMADA WAVELET

As wavelets podem ser vistas como uma evolução da Transformadas de Fourier e da Transformada de Fourier de Curto Tempo (*Short Time Fourier Transform* – STFT). A TF decompõe o sinal em uma somatória de funções seno e/ou cosseno com diferentes frequências, extraindo as características de frequência do sinal (DAUBECHIES, 1992 e MALLAT, 1999). Estas transformadas são adequadas para se obter as características de sinais estacionários, que não mudam ao longo do tempo.

Os cálculos são baseados em janelas de tamanho fixo. Resumidamente, ao se fazer a TF de um sinal, a informação em frequência deste sinal é calculada durante todo o sinal, deste modo se houver algum evento transitório, em um curto período de tempo ao longo do sinal, este transitório contribuirá em todo o cálculo da TF, mas a localização da frequência no tempo será perdida. Assim, a TF não é adequada para se analisar sinais não estacionários, como no caso de eventos em SEE.

Para contornar este problema, a STFT faz o cálculo utilizando uma sequência de janelas com tamanhos diferentes, conseguindo, assim, um melhor detalhamento na localização do transitório no sinal. No entanto, esta opção é matematicamente complexa, necessitando de um grande esforço computacional, tornando-a inviável para aplicações que requerem respostas rápidas, como aplicativos em tempo real.

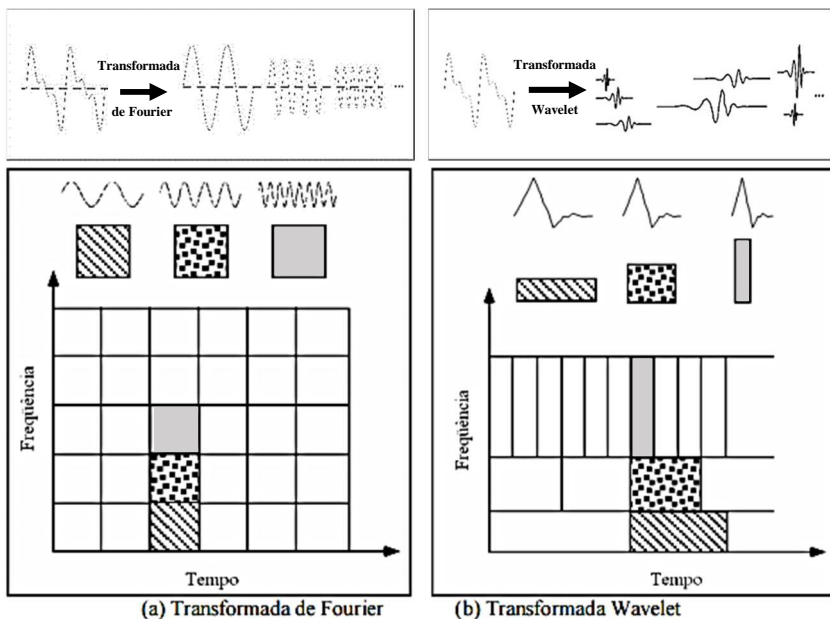
O termo “*wavelet*” é recente, seu desenvolvimento iniciou no início do século XX, tendo sua primeira publicação em uma tese de doutorado escrita por *Alfred Haar*, no ano de 1909. Entretanto, o termo “*Transformada Wavelet*” foi proposto apenas em 1981 pelo geofísico *Jean Morlet*. Os dados sísmicos estudados por *Morlet* exibiam

conteúdos de frequência que mudavam rapidamente ao longo do tempo, na qual as TFs não eram adequadas. Com isso, Morlet introduziu a TW, cuja janelas possuem tamanho variável, permitindo que eventos de alta frequência possam ser localizados com maior resolução temporal (BARBOSA; BLITZKOW, 2008).

Essa técnica com janelas de tamanho variável permite que, com o uso de janelas largas, se analisem as informações de baixa frequência do sinal e com janelas pequenas, se analisem as informações de alta frequência. Desta forma, por meio da TW é possível detectar o instante em que um sinal apresenta descontinuidades, característica típica de eventos em SEE.

Na Figura A.1 exemplifica-se a diferença entre a TF e a TW. Na parte superior, a TF decompõe o sinal em diferentes funções seno/cosseno com diferentes frequências, já a TW, decompõe o sinal em funções wavelets derivadas de uma única wavelet mãe. Essas derivações são denominadas de wavelets filhas e são versões escalonadas e transladadas da wavelet mãe.

Figura A.1 – Comparação entre a TF (a) e a TW (b).



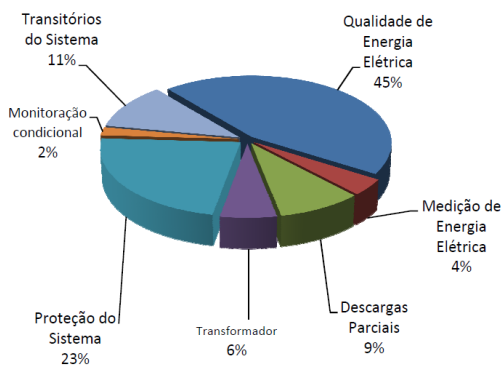
Em síntese, a TF é ideal para a análise de sinais estacionários que não contêm perturbações ao longo do período amostrado. Já a TW é ideal para a análise de sinais não estacionários, pois ela consegue extrair os detalhes do sinal com a informação temporal. A TW possui uma excelente capacidade para analisar sinais que contêm componentes senoidais associados a outros sinais e perturbações, como por exemplo, impulsos e transitórios de alta frequência, como é o caso típico dos distúrbios de curta duração que ocorrem nas redes elétricas de potência.

A.2. WAVELETS EM SEE

A TW é uma importante ferramenta para analisar de maneira rápida e efetiva as formas de onda da tensão e da corrente registrada durante distúrbios e/ou eventos não desejáveis em SEE. De acordo com Fernández (2002), o primeiro uso da transformada wavelet em sistemas de potência foi no ano de 1994, em um trabalho referente à análise de harmônicos em transitórios eletromagnéticos de sistemas de potência e, desde então, o número de trabalhos publicados tem se intensificado com veemência.

Kim e Aggarwal (2000; 2001) apresentaram estudos mostrando como a TW vem sendo aplicada em SEE. Na Figura A.2, mostra-se a percentagem da concentração dos estudos, evidenciando a grande concentração na área de qualidade de energia e proteção.

Figura A.2 – Porcentagem de publicações com a TW em sistemas de potência.

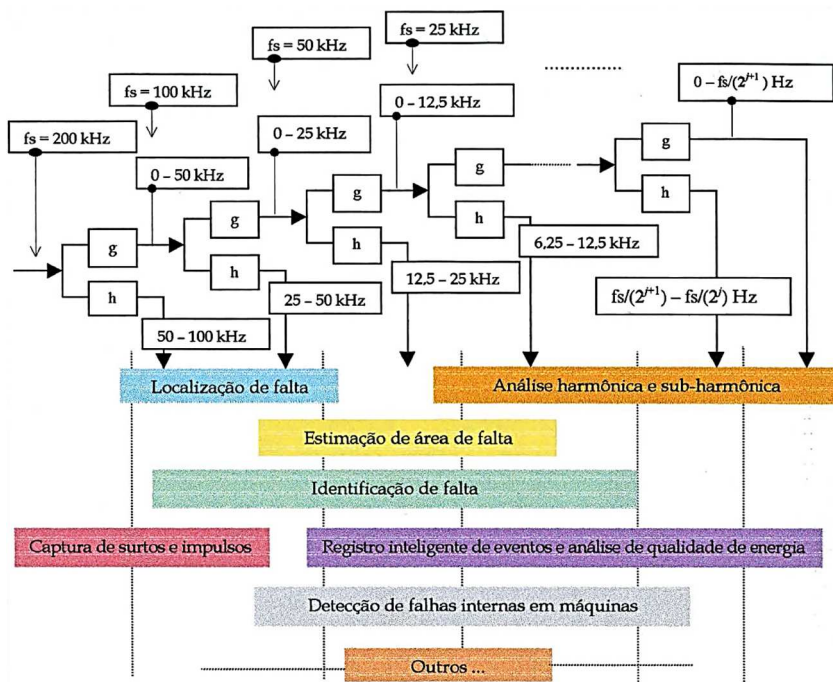


Com a desverticalização e privatização do setor elétrico, a qualidade de energia possui cada vez mais importância nos estudos de

fornecimento e de consumo, influenciadas pelo ambiente competitivo criado. Diversas técnicas que possuem capacidade de análise, tanto no domínio do tempo como no da frequência, têm sido desenvolvidas para estudos relacionados à qualidade da energia. A TW é uma das ferramentas que possui esta capacidade, sua decomposição, proporcionada pela análise multiresolução (AMR), fornece valiosas informações para detecção, localização no tempo e classificação de diferentes distúrbios relacionados com sinais elétricos.

Um exemplo da grande capacidade da TW nos SEE foi apresentado no trabalho de Silveira (2001). Ao estudar os fenômenos eletromagnéticos relacionados aos distúrbios que ocorrem em LTs, foi constatado que os *Intelligent Electronic Devices* (IED) (medidores, relés numéricos, etc.) necessitam de diferentes resoluções no tempo e diferentes larguras de banda a fim de cumprir os seus objetivos.

Figura A.3 – Sistema de supervisão/proteção de LTs baseado na Análise Multiresolução da TW.



Foi neste sentido que a TW se mostrou uma ferramenta de propósito geral a ser utilizada em análise de sinais em sistemas elétricos. O autor concluiu que o uso da TW pode ser implementado em IEDs multifunções, onde um só dispositivo é capaz de fazer a proteção/supervisão de LTs tendo como princípio o sistema utilizado na Figura A.3.

A.3. DESCRIÇÃO MATEMÁTICA

Wavelets são formas de onda escalonadas que medem variações no sinal. Viajando através de escalas, os procedimentos de zoom proporcionam poderosas caracterizações na estrutura dos sinais, como as singularidades.

MALLAT, 1999.

O nome wavelet vem de “pequena onda”, pois diferentemente da TF, o qual a função seno/cosseno existe para todo o tempo, são funções de curta duração e energia finita. Para que uma função possa ser considerada uma *wavelet mãe* (ψ), ela deve possuir as seguintes características:

- Média zero

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (A.1)$$

- Energia finita

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)|^2 dt = \text{constante} \quad (A.2)$$

As propriedades identificadas nas equações acima sugerem que a wavelet tende a oscilar acima e abaixo do eixo do tempo e possui energia localizada em determinada região, já que ela é finita. A característica de energia concentrada em uma região finita é a grande diferença da análise wavelet comparada à de Fourier, já que esta última usa funções que são funções periódicas.

As wavelet, definidas na Equação A.3, são versões escaladas e transladadas de uma função base, a wavelet mãe (ψ).

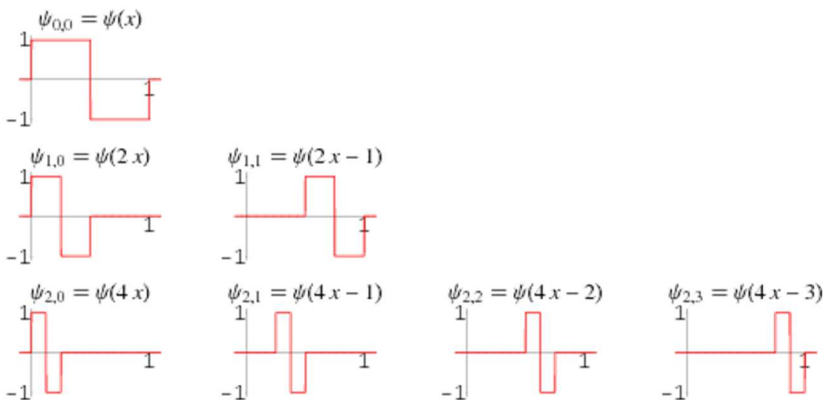
$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (\text{A.3})$$

Sendo " a " o fator de escala (dilatação), que estabelece o grau de compressão da função wavelet, " b " o parâmetro de translação, que determina a localização da wavelet no eixo do tempo e, por fim, " t " o instante temporal. Assim, para grandes valores no fator de escala a função é uma versão dilatada da wavelet mãe, fornecendo maior resolução no tempo, o que corresponde às baixas frequências. Em contrapartida, para um valor pequeno no fator de escala, a função é uma versão contraída da wavelet mãe, com menor suporte no domínio do tempo, correspondendo às altas frequências. É deste modo que as wavelets se adaptam na largura da janela para análise das frequências.

A.3.1. Fator de Escala e Fator de Translação

Escalar uma função wavelet significa dilatá-la ou contraí-la por meio de um fator de escala " a ". Transladar a função significa atrasá-la ou adiantá-la em relação ao eixo do tempo por meio de um fator de translação " b ". A Figura A.4 mostra a função wavelet *Haar* com 3 níveis de escalas e algumas translações no eixo do tempo.

Figura A.4 – Escala e Translação da Wavelet Haar.



Fonte: WOLFRAM, 2016.

Há três linhas na Figura A.4, na primeira linha a wavelet possui fatores $a = 0$ e $b = 0$. Na segunda linha a wavelet foi comprimida ($a =$

1 e $b = 0$) e no gráfico ao lado transladada ($a = 1$ e $b = 1$). Já na última linha, a função é novamente comprimida e nos gráficos ao lado transladadas no eixo do tempo.

Nas transformadas wavelets, os cálculos são feitos por meio de um fator de escala que se desloca ao longo de todo o sinal e, então, um novo fator de escala é definido, percorrendo novamente todo o sinal. Este processo se repete até o nível de escala desejado. Cada fator de escala corresponde a um nível de decomposição, que analisa certa banda de frequência do sinal. Quanto ao valor do fator de escala tem-se:

- baixa escala \rightarrow Wavelet contraída \rightarrow Detalhes de alta frequência;
- alta escala \rightarrow Wavelet dilatada \rightarrow Detalhes de baixa frequência.

A.4. TRANSFORMADA WAVELET

A Transformada Wavelet é uma operação linear que decompõe um sinal em diferentes escalas com diferentes níveis de resolução. No entanto, há dois tipos diferentes de TW, na versão contínua e na discreta.

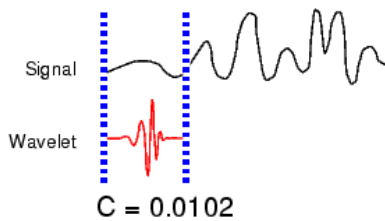
A.4.1. Transformada Wavelet Contínua

A TWC é definida como uma integral por toda a extensão temporal, onde o sinal $f(t)$ é multiplicado por um conjunto de wavelets distintas $\psi_{a,b}(t)$, que são as versões escalonadas e transladadas da wavelet mãe, como mostrado na Equação A.4.

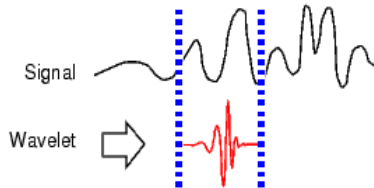
$$TWC(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \psi_{a,b}(t) dt \quad (A.4)$$

O coeficiente wavelet calculado ($TWC(a, b)$), indica o grau de correlação entre o sinal original e a wavelet mãe associada. Quanto maior o valor do coeficiente wavelet, maior a similaridade do sinal com a wavelet utilizada. O cálculo da transformada wavelet contínua pode ser efetuado em cinco passos (MISITI et al., 1996):

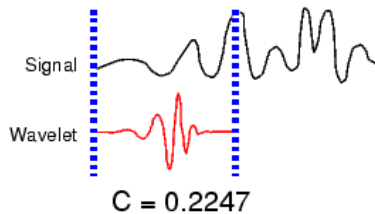
- 1) Alinha-se a wavelet mãe desejada no início do sinal original;
- 2) Calcula-se o coeficiente wavelet;



3) Translade a wavelet para a direita, ou seja, modifica-se o valor de “ b ” e repete os dois primeiros passos até que todo o sinal original tenha sido percorrido pela wavelet;



4) Faz-se um escalonamento (dilatação) da wavelet modificando o valor de “ a ” e repete os passos de 1 a 3;



5) Repetem-se todos os passos anteriores para todas as escalas desejadas.

Após realizar o processo para todos os níveis de escala desejados, tem-se os coeficientes wavelet do sinal, ou seja, a representação wavelet do sinal com respeito à wavelet mãe $\psi(t)$.

A TWC é computada de uma forma em que a escala da wavelet mãe é alterada, multiplicada pelo sinal e transladada. Multiplica-se pelo

signal até percorrê-lo inúmeras vezes até a quantidade de escalas desejadas. Isso gera uma quantidade de dados elevada, sendo que muitas das informações obtidas são redundantes, acarretando em um grande esforço computacional (REIS e SILVA, 2004).

Para contornar isso, foi desenvolvida uma versão discretizada, que utiliza filtros criados por meio da wavelet mãe. Esta técnica é uma versão muito mais eficiente e tão eficaz quanto a TWC, denominada de Transformada Wavelet Discreta (TWD).

A.4.2. Transformada Wavelet Discreta

A TWD é uma versão computacionalmente mais eficiente, de fácil implementação e com esforço computacional muito menor. Um método rápido e confiável foi apresentado em Mallat (1989), onde o cálculo da TWD é realizado por meio de um processo de AMR, o qual obtém “aproximações” e “detalhes” do sinal analisado. A aproximação é uma versão mais suave do sinal original, representando as baixas frequências, enquanto que o detalhe é a representação das altas frequências do sinal.

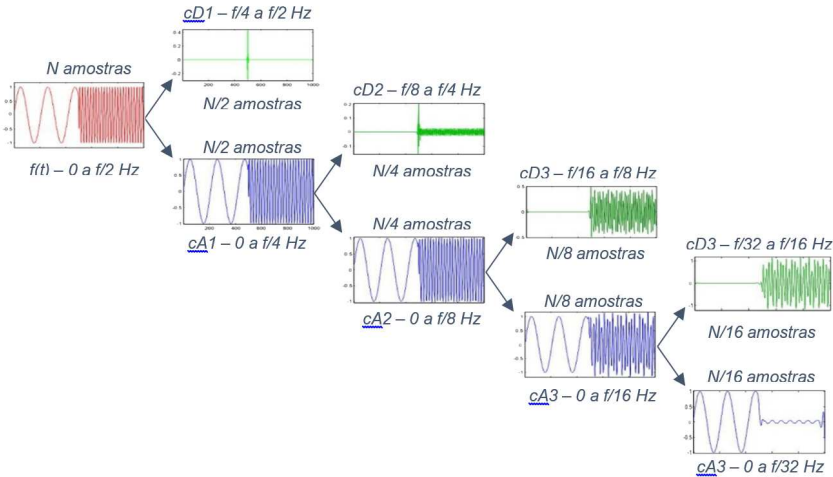
Na AMR, um sinal $x[n]$ é submetido a uma série de decomposições em cascata. Ele passa por dois filtros, um passa-baixa g_i e outro passa-alta h_i , dando origem aos coeficientes de aproximação cA_j e de detalhe cD_j , cada um com metade do tamanho do sinal original, processo denominado “dizimação por 2”. O vetor dos coeficientes de aproximação representa uma versão mais suave (filtrada) do sinal original e pode ser submetido a uma nova decomposição, gerando novos coeficientes cA_{j+1} e cD_{j+1} , onde $j = 1, 2, \dots, J$ e J é o nível de decomposição desejado. O esquema da AMR é mostrado na Figura A.5.

Os filtros são formados pelos coeficientes da função wavelet-mãe e da função de escala associada a cada wavelet-mãe. O cálculo é realizado por meio da convolução (produto interno) do sinal com os coeficientes da função de escala e da função wavelet, respectivamente.

É importante salientar que a TWD é realizada por intermédio de uma dizimação por 2, e para garantir o uso correto das características de recursividade até a última iteração possível (restando apenas 1 elemento), o número de elementos a ser analisado deve ser uma potência de 2. O tamanho da janela deve ser 2^J , sendo J um número inteiro que se refere ao nível de decomposição desejado. Por exemplo, se são desejáveis 8 níveis de decomposição, o número de dados deve ser $2^8 = 256$ amostras. A janela deve respeitar essa relação para evitar os

“problemas de borda”, causados pela má divisão do sinal nas decomposições e garantir que o sinal possa ser reconstruído. Este problema pode ser comparado com o vazamento espectral da TF.

Figura A.5 – Esquema da Análise Multiresolução da TWD.



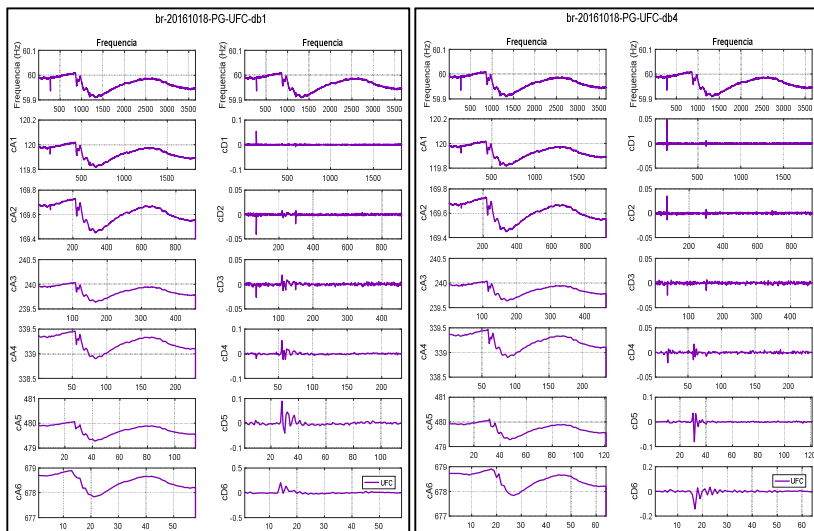
Os coeficientes de detalhe apresentam os componentes de alta frequência do sinal, enquanto que os coeficientes de aproximação apresentam os componentes de menor frequência. De acordo com o *Teorema de Nyquist*, apenas metade da frequência de um sinal amostrado pode ser observada, conforme demonstrado na Figura A.5.

Como as altas frequências são separadas das baixas, pode-se dizer em sinais em SEEs, que os coeficientes de aproximação compõem a tendência do sinal e os coeficientes de detalhe apresentam os transitórios de alta frequência, como por exemplo, os instantes de ocorrência de eventos.

Na Figura A.6, é apresentado o resultado de uma decomposição em 6 níveis no sinal da frequência do terminal UFC, utilizando a wavelet mãe *Haar* (db1) e *Daubechies* 4 (db4), de um evento do tipo perda de geração que ocorreu no dia 18 de outubro de 2016 às 06h01min, registrado pelo SMSF do Projeto MedFasee BT. Observa-se que os coeficientes de aproximação se assemelham ao sinal original filtrado, sendo que a cada nível este sinal fica mais suave. Já nos coeficientes de detalhe, as variações mais bruscas aparecem nos

primeiros níveis de decomposição e as variações mais lentas aparecem nos maiores níveis.

Figura A.6 – Análise Multiresolução da TWD em 6 níveis.



Como pode ser observado na Figura A.6, a ocorrência de eventos em SEEs é visível nos coeficientes de detalhe da TWD, o qual do lado esquerdo utiliza-se a wavelet-mãe Haar (db1) e do lado direito a Daubechies 4 (db4). No presente trabalho, esta informação é utilizada para se fazer a detecção de eventos. Cada tipo de evento possui um comportamento diferenciado ao longo dos níveis de decomposição, sendo assim, este comportamento pode ser utilizado para classificar seus variados tipos.

Na TWD o sinal pode ser reconstruído por meio de filtros de reconstrução g'_i e h'_i , que são versões espelhadas dos filtros g_i e h_i formando um conjunto denominado *Quadrature Mirror Filters* (QMF). Cada *wavelet mãe* possui seus próprios coeficientes wavelets, cujos valores tabelados podem ser facilmente encontrados na literatura. Uma abordagem técnica sobre a construção desses filtros pode ser encontrada em Strang e Nguyen (1996). Uma lista com o valor dos coeficientes da família Daubechies pode ser visto no final deste apêndice.

A.5. PRINCIPAIS WAVELETS MÃE

Existe uma grande variedade de funções wavelet na literatura, cada tipo de wavelet mãe possui uma aplicação diferenciada. Cada função wavelet ψ possui consigo uma função de escala ϕ própria, sendo ortogonais entre si ($\phi \perp \psi$).

Algumas das wavelets mais utilizadas são: *Haar*, *Daubechies*, *Morlet*, *Symlets*, *Meyer* e *Mexican Hat*. A wavelet *Haar*, além de ser a wavelet mais antiga, é considerada como a wavelet mais simples e de mais fácil implementação computacional existente. O reconhecimento de padrões de imagens, é um campo com vasto emprego dessa wavelet.

A seguir, nas Figuras A.7 a A.10, algumas wavelets são apresentadas em gráficos contendo a função de escala (vermelho) e a função wavelet (verde) respectivamente, exceto as wavelets *Morlet* e *Mexican Hat* que não possuem função de escala. Tais funções dão origem aos filtros passa alta e passa baixa utilizados no processo da TWD.

Nos tutoriais publicados por Kim e Aggarwal (2000; 2001), os autores afirmam que wavelets com variações abruptas (como a wavelet de Haar) são indicadas para análises onde se deseja uma melhor resolução no domínio do tempo. Já as wavelets suaves são mais indicadas para análises com uma melhor resolução de frequência.

Figura A.7 – Wavelets (a) Haar e (b) Meyer.

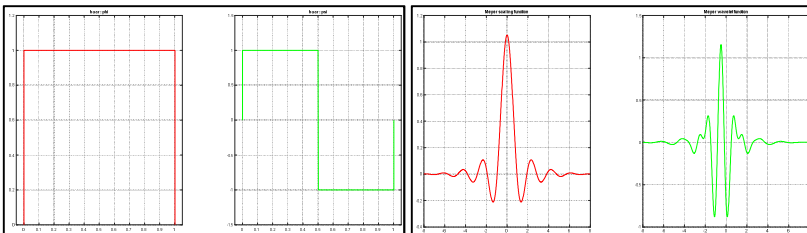


Figura A.8 – Wavelets (a) Daubechies 4 e (b) Daubechies 10.

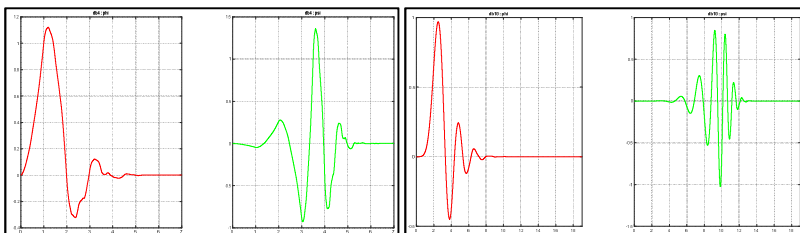


Figura A.9 – Wavelets (a) Symlets 4 e (b) Symlets 8.

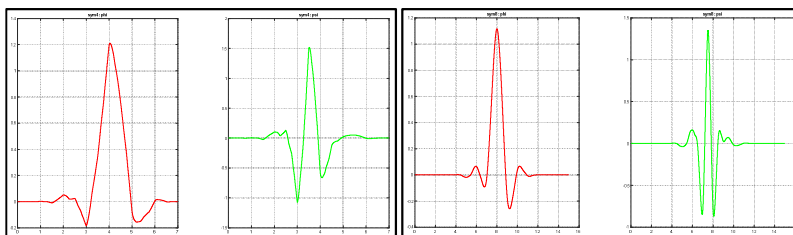
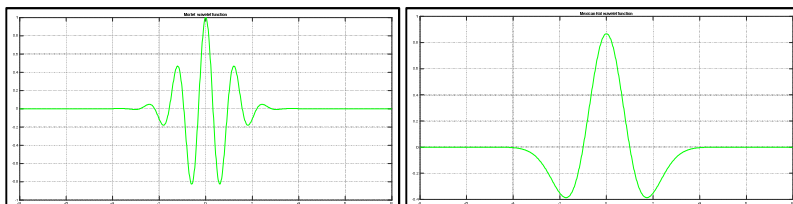


Figura A.10 – Wavelets (a) Mexican Hat e (b) Morlet.



APÊNDICE B – PSEUDO ALGORITMOS

B.1. DETECÇÃO DE EVENTOS

```

Início {
  Cont = 0; Timer = 0; Em_evento = FALSE;
  Enquanto Verdadeiro {
    Para cada i-ésima PMU {
      Atualizar janela deslizante (Equação 4.8)
      Calcular EWM (Equação 4.9) e EWN (Equação 4.10)
      Se  $EWN > threshold_1$  {
        Cont++;
        Timer = ON;
        Armazenar dados da PMU;
        Se  $Cont > 1 \ \& \ Timer \leq 300 \text{ ms}$  {
          Em_evento = TRUE; } } }
      Se  $Timer > 300 \text{ ms}$  {
        Se Em_evento = TRUE {
          Se  $Timer > 1000 \text{ ms}$  {
            INICIAR CLASSIFICAÇÃO;
            Cont = 0; Timer = 0; Timer = OFF; Em_evento = FALSE;
            Limpar dados armazenados;} }
        Senão {
          Cont = 0; Timer = 0; Timer = OFF; } } }

```

B.2. CLASSIFICAÇÃO DE EVENTOS

```

Início {
  S = 0; G = 0; C = 0; I = 0;
  Armazenar 20 fasores passados e 108 novos da frequência e da
  diferença angular de todas as PMUS;
  Calcular Energias (Equações 4.11 a 4.14);
  Para cada i-ésima PMU {
    Se  $|E_H| \leq threshold\_2$  {
      Tipo(i) = Salto; S++; }
    Senão Se  $E_H > 0$  {
      Tipo(i) = Perda de geração; G++; }
    Senão {
      Tipo(i) = Perda de carga; C++; }
    VERIFICAÇÃO DE ILHAMENTO {
      Se houver ultrapassagem de  $\pm 180^\circ$  na diferença angular {
        Tipo(i) = Ilhamento; I++; } } }
  Se I > 0 {
    Diagnóstico = ILHAMENTO }
  Senão Se  $G \geq 6$  &  $C \leq 2$  {
    Diagnóstico = PERDA DE GERAÇÃO }
  Senão Se  $C \geq 6$  &  $G \leq 2$  {
    Diagnóstico = PERDA DE CARGA }
  Senão {
    Diagnóstico = SALTO }
  Imprimir Diagnóstico; }

```


APÊNDICE C – EVENTOS UTILIZADOS NA SEÇÃO 4.3

Tabela C.1 – Perda de geração.

DATA	HORA	PMU utilizada	Descrição
22/11/12	16h54min	UFSC	Não reportado
21/03/15	19h36min	UNIR	Desligamento do Elo CC Madeira – Bipolo 1 e back-to-back
13/06/16	13h55min	UFPA	Não reportado
13/06/16	11h43min	UTFPR	Não reportado
01/07/16	07h47min	UFJF	Não reportado
04/07/16	19h19min	UNIPAMPA	Não reportado

Tabela C.2 – Perda de carga.

DATA	HORA	PMU utilizada	Descrição
06/04/17	06h48min	UFMT	Desligamento da transformação 345/138 kV e de LTs 138 kV interrompendo 157,7 MW de cargas.
25/02/17	21h49min	UNIFAP	Desligamento de LTs 500 kV desinterligando Manaus do restante do SIN. Interrupção de 345 MW de cargas em Manaus.
24/02/17	15h03min	UFMT	Não reportado.
30/11/16	17h09min	UFPA	Desligamento de LTs 500 kV seguido do desligamento geral do Sistema Manaus. Interrupção de 1390 MW de cargas.
26/10/16	16h07min	UTFPR	Desligamento de LTs 345 kV e da transformação 765/345 kV de FURNAS. Interrupção de 3200 MW de cargas no SIN.
23/10/16	17h28min	UFT	Desligamento de LTs 500 kV ocasionando o desligamento geral do Sistema Manaus. Interrupção de 841 MW de cargas.

Tabela C.3 – Ilhamento.

DATA	HORA	PMU utilizada	Descrição
30/08/16	15h48min	UFBA	Abertura da Interligação Norte-Nordeste/Sudeste. Atuação do ERAC interrompendo 3500 MW de cargas no Subsistema Norte-Nordeste.
13/06/16	09h20min	UFAC	Abertura da interligação 230 kV entre os estados de Mato Grosso e Rondônia, isolando o Subsistema Acre-Rondônia do restante do SIN (não reportado).
26/10/16	19h49min	UNIR	Bloqueio de Back-to-Back e LTs 230 kV, abrindo a interligação do Subsistema Acre-Rondônia com o restante do SIN. Atuação do ERAC interrompendo 167 MW de cargas neste subsistema.

11/01/16	02h45min	UNIFAP	Abertura da interligação 230 kV (não reportado).
17/02/17	15h29min	UFAC	Desligamento de LT 500 kV, LTs 230 kV e equipamentos nas áreas norte e nordeste do estado de Mato Grosso. Mato Grosso permaneceu interligado ao Subsistema Acre-Rondônia que ficou separado do restante do SIN.
03/05/17	20h39min	UNIFAP	Abertura da interligação 230 kV.

Tabela C.4 – Salto.

DATA	HORA	PMU utilizada	Descrição
23/02/17	19h53min	UTFPR	Não reportado.
16/02/17	10h28min	UFBA	Não reportado.
11/12/16	20h27min	UFMG	Não reportado.
23/11/16	04h52min	UFJF	Não reportado.
15/10/16	17h41min	UFMA	Não reportado.

Tabela C.5 – Salto seguido de oscilação.

DATA	HORA	PMUs utilizadas	Descrição
24/11/16	16:35:26,2	Na figura	Abertura de LT 500 kV (não reportado).

APÊNDICE D – EVENTOS UTILIZADOS NA SEÇÃO 4.5

D.1. ESTIMAÇÃO DA MAGNITUDE DE EVENTOS COM A TAXA DE VARIAÇÃO DA FREQUENCIA MÉDIA DO SISTEMA

Figura D.1 – Estimação da magnitude para eventos menores do que 500 MW utilizando a Equação 4.23.

ESTIMAÇÃO DA MAGNITUDE DE EVENTOS < 500 MW								
Amostra	EVENTO	DATA	Hora	df/dt [mHz/s]	Magnitude		erro	
					ONS	Estimada		
3057	br-20160913-PC88MW-Brasilia	13/09/2016	10:40:50	4,0892611	88	95,26	8,25%	
604	br-20161015-DLT230kv-PC107MW-UFMA	15/10/2016	17:41:10	4,4452252	107	101,73	4,92%	
1162	br-20161022-PC125MW-Anapolis	22/10/2016	04:02:49	7,0401518	125	148,94	19,15%	
197	br-20161118-PC144MW-PV	18/11/2016	15:14:53	5,7780816	144	125,98	12,51%	
1290	br-20161122-PC160MW-Manaus	22/11/2016	18:27:21	4,8625571	160	109,33	31,67%	
894	br-20170207-PC176MW-PE	07/02/2017	12:30:44	9,8398523	176	199,87	13,56%	
879	br-20170207-PC178MW-PE	07/02/2017	14:40:14	10,0251468	178	203,24	14,18%	
407	br-20161017-PC206.5MW-PR	17/10/2016	15:09:36	7,9844856	206,5	166,12	19,55%	
4148	br-20170225-PC345MW-UNIFAP	25/02/2017	21:49:09	12,3672448	345	245,85	28,74%	
928	br-20161017-PC396MW-SP	17/10/2016	21:15:35	18,7533898	396	362,03	8,58%	
1893	20150426_PC_Goias_279MW	26/04/2015	11:38:11	14,3507275	279	281,94	1,05%	
614	20150427_PC_Belem_300MW	27/04/2015	12:02:40	13,7030831	300	270,15	9,95%	
						Média	14,34%	

Figura D.2 – Estimação da magnitude para eventos maiores do que 500 MW utilizando a Equação 4.24.

ESTIMAÇÃO DA MAGNITUDE DE EVENTOS > 500 MW								
Amostra	EVENTO	DATA	Hora	df/dt [mHz/s]	Magnitude		erro	
					ONS	Estimada		
1055	br-20161017-PC564MW-SP	17/10/2016	19:56:27	28,7361646	564	714,5734913	26,70%	
480	br-20161023-PC841MW-UNIFAP	23/10/2016	17:28:03	23,7444804	841	561,1440941	33,28%	
333	br-20161026-PC3200MW-Itaipu	26/10/2016	16:07:35	109,2411695	3200	3189,055827	0,34%	
1213	br-20161117-PC630-Salvador	17/11/2016	12:42:50	36,0743693	630	940,1278892	49,23%	
3649	br-20161130-PC1390-Manaus	30/11/2016	17:09:31	45,1804150	1390	1220,020416	12,23%	
						Média	24,35%	

D.2. ESTIMAÇÃO DA MAGNITUDE DE EVENTOS COM A E_H MÉDIA DO SISTEMA

Figura D.3 – Estimação da magnitude para eventos menores do que 500 MW utilizando a Equação 4.25.

ESTIMAÇÃO DA MAGNITUDE DE EVENTOS < 500 MW							
Amostra	EVENTO	DATA	Hora	Energia [mHz^2]	Magnitude		erro
					ONS	Estimada	
3057	br-20160913-PC88MW-Brasilia	13/09/2016	10:40:50	1,0959104	88	105,64	20,05%
604	br-20161015-DLT230kv-PC107MW-UFMA	15/10/2016	17:41:10	1,4404237	107	112,02	4,69%
1162	br-20161022-PC125MW-Anapolis	22/10/2016	04:02:49	2,7620021	125	136,48	9,18%
197	br-20161118-PC144MW-PV	18/11/2016	15:14:53	2,3753106	144	129,32	10,19%
1290	br-20161122-PC160MW-Manaus	22/11/2016	18:27:21	1,4190353	160	111,62	30,24%
894	br-20170207-PC176MW-PE	07/02/2017	12:30:44	6,1545415	176	199,27	13,22%
879	br-20170207-PC178MW-PE	07/02/2017	14:40:14	6,2019209	178	200,14	12,44%
407	br-20161017-PC206,5MW-PR	17/10/2016	15:09:36	3,3318828	206,5	147,02	28,80%
4148	br-20170225-PC345MW-UNIFAP	25/02/2017	21:49:09	10,3255401	345	276,46	19,87%
928	br-20161017-PC396MW-SP	17/10/2016	21:15:35	17,9514843	396	417,60	5,46%
1893	20150426_PC_Goias_279MW	26/04/2015	11:38:11	10,5377227	279	280,39	0,50%
614	20150427_PC_Belem_300MW	27/04/2015	12:02:40	11,4164648	300	296,65	1,12%
						Média	12,98%

Figura D.4 – Estimação da magnitude para eventos maiores do que 500 MW utilizando a Equação 4.26.

ESTIMAÇÃO DA MAGNITUDE DE EVENTOS > 500 MW							
Amostra	EVENTO	DATA	Hora	Energia [mHz^2]	Magnitude		erro
					ONS	Estimada	
803	br-20161014-PC605MW-AM	14/10/2016	17:19:13	7,0803653	605	618,41	2,22%
1055	br-20161017-PC564MW-SP	17/10/2016	19:56:27	40,9856662	564	744,95	32,08%
480	br-20161023-PC841MW-UNIFAP	23/10/2016	17:28:03	33,7724581	841	718,03	14,62%
333	br-20161026-PC3200MW-Itaipu	26/10/2016	16:07:35	707,7335162	3200	3233,32	1,04%
1213	br-20161117-PC630-Salvador	17/11/2016	12:42:50	65,8863381	630	837,88	33,00%
3649	br-20161130-PC1390-Manaus	30/11/2016	17:09:31	130,0492149	1390	1077,35	22,49%
						Média	17,58%